© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

بهسازی خاک

فصل ششم: جایگزینی عمیق

دکتر علی‌رضا غنی‌زاده

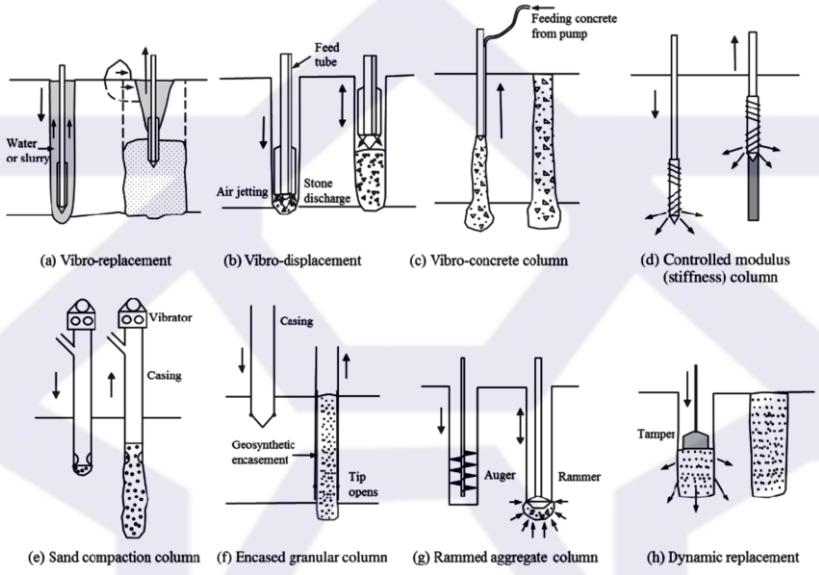
استادیار دانشکده مهندسی عمران – دانشگاه صنعتی سیرجان

تعریف

- در روش جایگزینی عمیق، تا یک عمق نسبتاً زیاد (۵ تا ۱۵ متر)، خاک موجود حفاری یا جابجا می‌شود و سپس با مصالح با کیفیت به شکل یکسری ستون پر و جایگزین می‌شود.
- ستون‌ها به همراه خاک اطراف تشکیل یک پی مرکب با ظرفیت باربری بیشتر برای تحمل بارهای افقی و قائم را می‌دهد.
- استفاده از روش جابجایی برای خاک های برای خاک های ریزدانه اشباع سبب دستخوردگی زیاد خاک و در نتیجه تورم و جابجایی جانبی خاک می‌شود و به همین دلیل مناسب نیست.

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

انواع روش های جایگزینی عمیق



انواع روش های Vibro

Vibro-compaction

- ✓ تراکم خاک محل بدون برداشت و ریختن خاک

Vibro-replacement

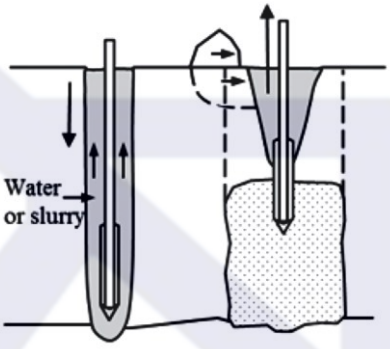
- ✓ حفاری خام محل و پر نمودن جای خالی با مصالح با کیفیت

Vibro-displacement

- ✓ جابجا نمودن خاک (فشار دادن خاک) و پر نمودن آن با مصالح با کیفیت

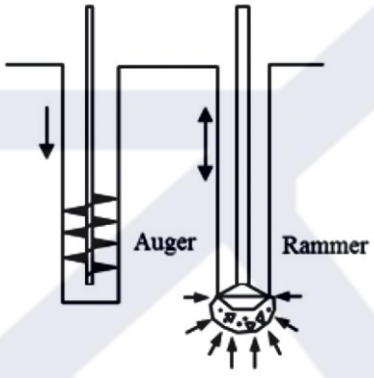
© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

روش‌های مختلف حفاری زمین



(a) Vibro-replacement

حفاری با استفاده از فشار آب



(g) Rammed aggregate column

حفاری با استفاده از مته

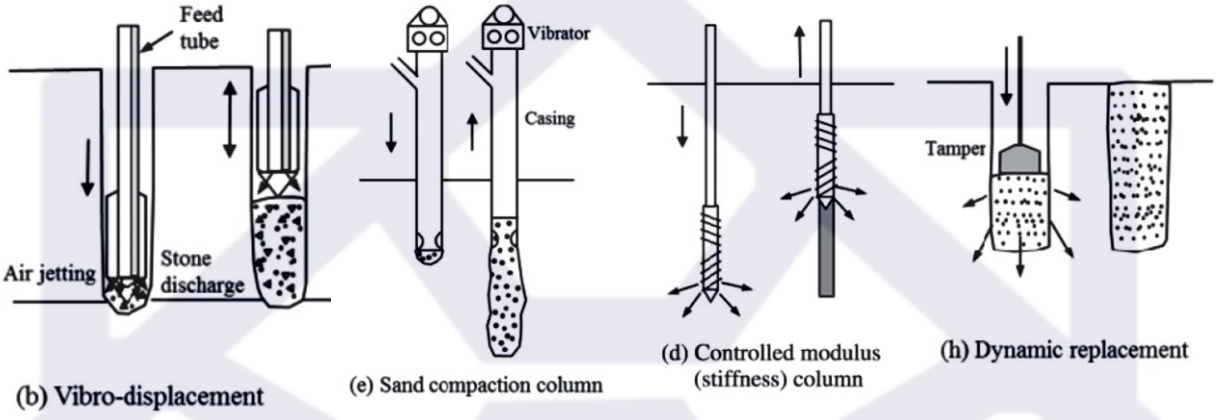
روش‌های مختلف حفاری زمین

by drilling a hole in the ground

by injecting water into the ground, turning the geomaterial into slurry, and flushing it out from the hole.

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

روش‌های مختلف جابجایی خاک



(b) Vibro-displacement

(e) Sand compaction column

(d) Controlled modulus (stiffness) column

(h) Dynamic replacement

تزریق هوا

فرو بردن غلاف فولادی

مته با جهت چرخش معکوس

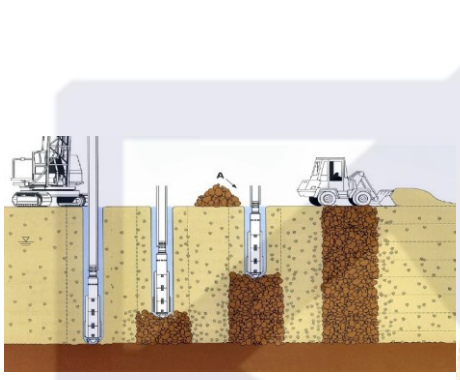
پرتاب وزنه

کاربرد روش‌های جایگزینی عمیق

- ✓ افزایش ظرفیت باربری
- ✓ افزایش چگالی خاک
- ✓ کاهش نشست
- ✓ تأمین پایداری جانبی
- ✓ تسریع تحکیم
- ✓ افزایش مقاومت در برابر روانگرایی

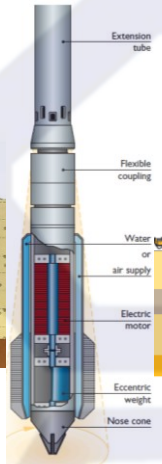
© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

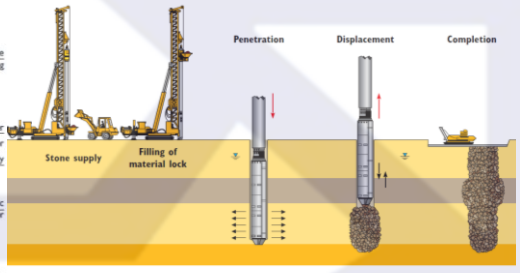
انواع روش های اجرای ستون های سنگی



Top Feeding Method

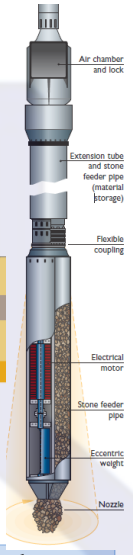
روش تراکم لرزشی



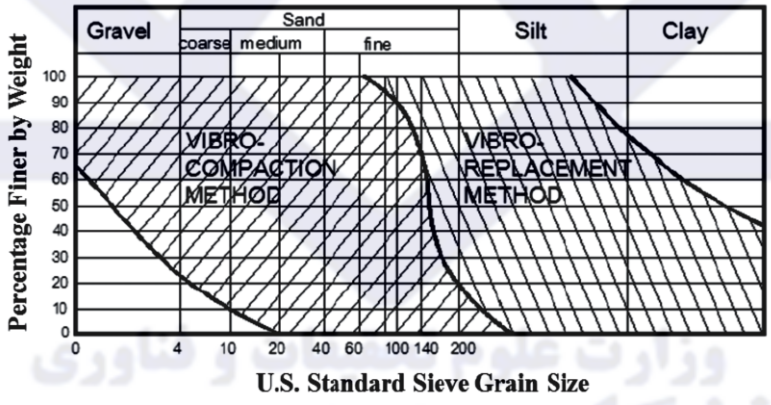


Bottom Feeding Method

روش جایگزینی لرزشی



مصالح مناسب برای روش‌های تراکم لرزشی و جابجایی لرزشی



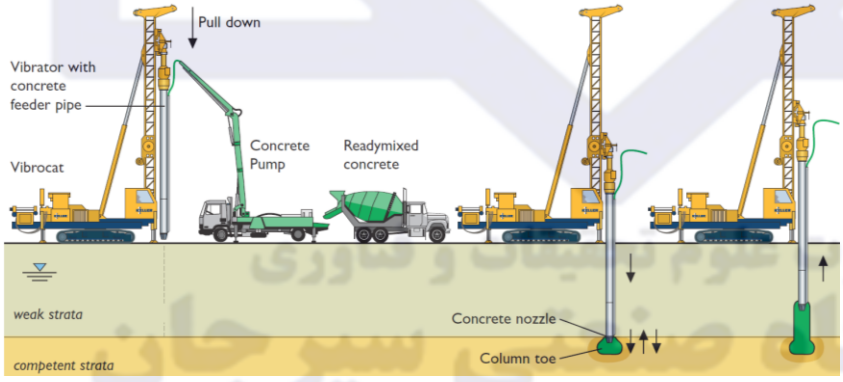
- ✓ روش تراکم ویبره بر اساس متراکم کردن خاک قرار دارد در حالی که روش جابجایی لرزشی علاوه بر خاک محل ستون‌های سنگی نیز در داخل خاک ایجاد می‌شوند تا تشکیل یک پی مرکب را بدهند.

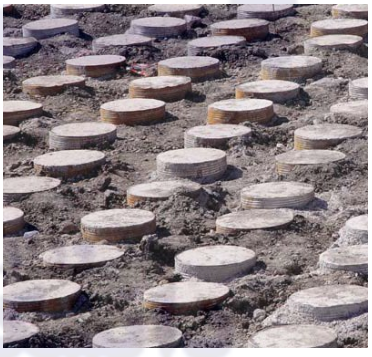
© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مزایای روش جایگزینی در حالت خوراک دهی از پایین

- ✓ نصب سریع و آسان
- ✓ مقاومت و سختی بیشتر نسبت به ستون اجرا شده به روش تراکم لرزشی
- ✓ مصالح به صورت مستقیم به نوک ستون ریخته می شوند و در نتیجه کیفیت اجرا یکنواخت تر است.
- ✓ تنها یک مرنبه نفوذ لازم است.
- ✓ وجود فشار هوا مانع ریزش چاله حتی در خاک های سست می‌شود.
- ✓ عدم استفاده از آب سبب جلوگیری از ایجاد گل و لای می‌شود.

روش Vibro-Concrete





© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مزایا و محدودیتهای روش Vibro-concrete

- ✓ مقاومت و سختی بیشتر در مقایسه با مصالح سنگدانه‌ای
- ✓ فرایند نصب سریع
- ✓ این روش در مقایسه با ستونهای سنگی پر هزینه تر است.
- ✓ قابلیت اجرا در خاک های بسیار نرم و آلی

کاربرد روش های مختلف با توجه به نوع خاک

- ✓ روش Vibro-replacement اکثراً برای خاک های چسبنده با مقاومت برشی زهکشی نشده بیش از ۱۵ کیلو پاسکال به کار می رود.
- ✓ روش Vibro-displecement برای خاک های چسبنده غیر حساس با مقاومت برشی زهکشی نشده بین ۱۵ الی ۶۰ کیلو پاسکال برای ستون های سنگی مناسب است. برای خاک های ضعیف‌تر از ستون‌های Vibro-concrete استفاده می‌شود.
- ✓ روش Sand compaction column برای خاک‌های جسبنده و غیرچسبنده کاربر دارد.
- ✓ روش Geosynthetic encased soil columns برای خاک‌های بسیار نرم و آلی با مقاومت برشی زهکشی نشده کمتر از ۱۰ کیلو پاسکال به کار می رود.
- ✓ روش Rammed aggregate برای رس‌های نرم تا سخت، لای‌های شل، ماسه شل و متراکم و خاکریزهای کنترل نشدهکاربرد دارد.

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

اصول: وظایف ستون‌های سنگی و بتنی

- ✓ متراکم سازی
- ✓ افزایش ظرفیت باربری خاک
- ✓ مسلح‌سازی
- ✓ توزیع تنش
- ✓ زهکشی

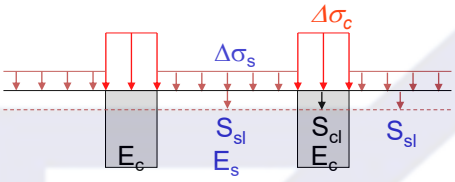
اصول: مکانیزم‌های انتقال بار و فرضیات مربوط به تحلیل

- ✓ کرنش همسان
- ✓ تنش همسان
- ✓ حالت بین تنش و کرنش همسان (خاکریزهای متکی بر ستونهای سنگی)

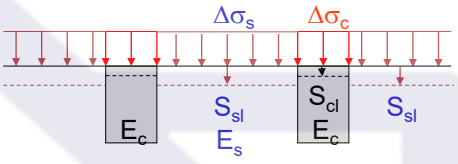
وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

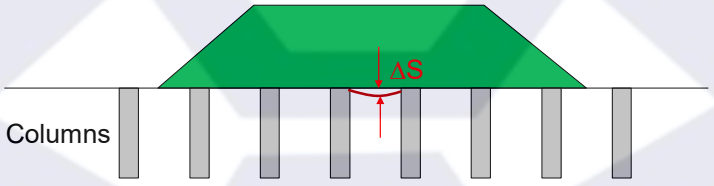
اصول: مکانیزم‌های انتقال بار و فرضیات مربوط به تحلیل



Equal strain-rigid loading

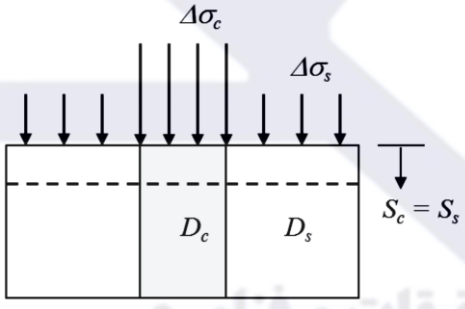


Equal stress-flexible loading

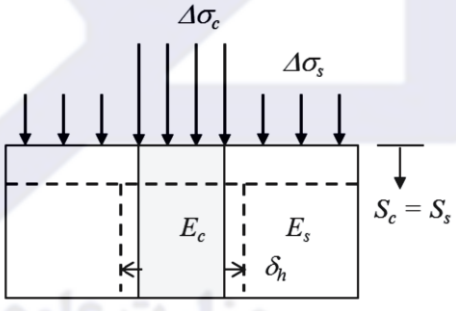


✓ نسبت تنش وارد به ستون به تنش وارد بر خاک، نسبت تمرکز تنش **(n)** نامیده می‌شود.

اصول: روش سلول واحد و تعیین نسبت تمرکز تنش



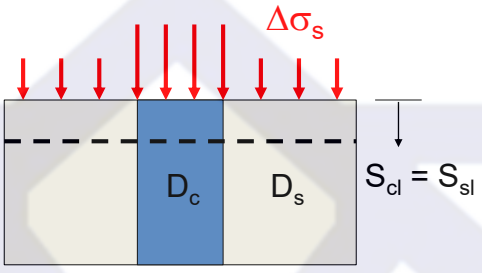
One-dimensional unit cells without lateral deformation of column.



One-dimensional unit cells with lateral deformation of column.

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

اصول: نسبت تمرکز تنش در حالت محدودیت کرنش جانبی (1D)



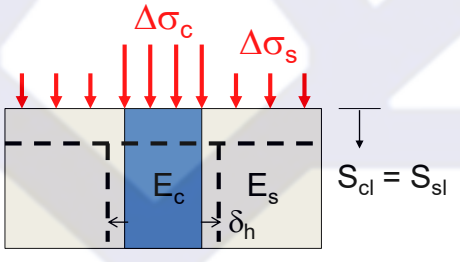
$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_c}{D_c} = \frac{\Delta\sigma_s}{D_s}$$

ε_z = vertical strain at a depth of z
$\Delta\sigma_c$ = vertical stress on the column
$\Delta\sigma_s$ = vertical stress on the soil
D_c = constrained modulus of the column
D_s = constrained modulus of the soil

$$n_{1D} = \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_s} = \frac{D_c}{D_s}$$

۱۹ | بهسازی خاک | دانشگاه صنعتی سیرجان

اصول: نسبت تمرکز تنش در حالت عدم محدودیت کرنش جانبی (3D)



$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_{cz} - \nu(\Delta\sigma_{cx} + \Delta\sigma_{cy})}{E_c} = \frac{\Delta\sigma_{sz} - \nu(\Delta\sigma_{sx} + \Delta\sigma_{sy})}{E_s}$$

$$n_{3D} \neq \frac{E_c}{E_s}$$

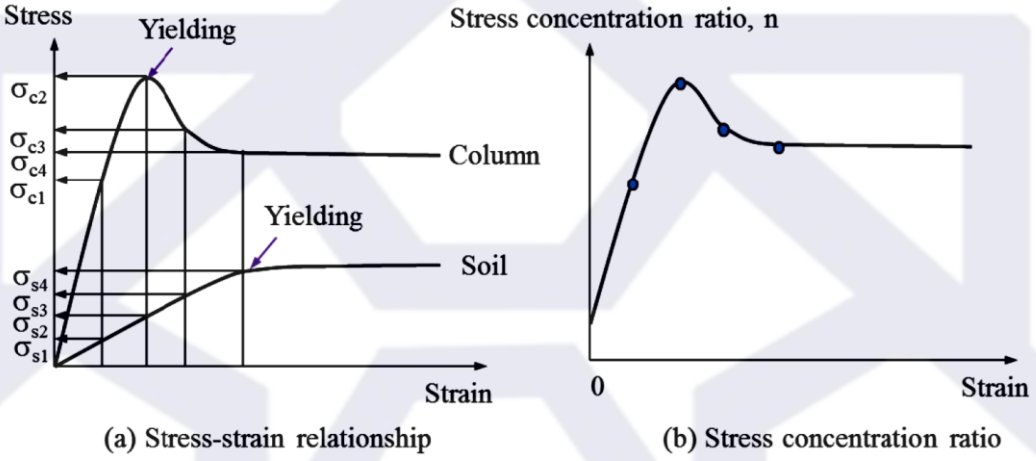
ε_z = vertical strain at a depth of z
$\Delta\sigma_{cx}, \Delta\sigma_{cy}, \Delta\sigma_{cz}$ = stresses on the column in the x, y, z directions, respectively
$\Delta\sigma_{sx}, \Delta\sigma_{sy}, \Delta\sigma_{sz}$ = stresses on the soil in the x, y, z directions, respectively
E_c = elastic modulus of the column
E_s = elastic modulus of the soil
n_{3D} = stress concentration ratio considering lateral deformation of the column (i.e., a 3D condition)

۲۰ | بهسازی خاک | دانشگاه صنعتی سیرجان

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

اصول: تغییر نسبت تمرکز تنش با توجه به میزان کرنش

- نسبت تمرکز تنش تابعی از میزان تنش یا کرنش است و مقداری ثابت نیست.



(a) Stress-strain relationship (b) Stress concentration ratio

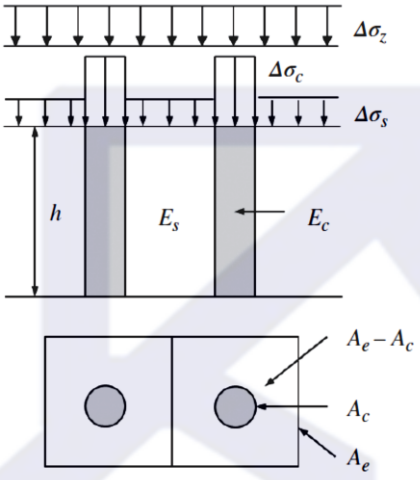
اصول: راهنمای کلی در انتخاب نسبت تمرکز تنش

- برای ستون های سنگی و ماسه ای بین ۱ تا ۵
- برای ستون های بتنی بیش از ۱۰
- برای ستون های سنگی محدود شده در داخل ژئوسینتتیک بیش از ۸/۵. این ضریب با افزایش سختی ژئوسینتتیک افزایش می یابد.

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

اصول: سختی پی مرکب حاصل از ستون و خاک اطراف



$$\Delta\sigma_z A_e = \Delta\sigma_s(A_e - A_c) + \Delta\sigma_c A_c \qquad (5.6)$$

where $\Delta\sigma_z$ = average vertical stress applied on the composite foundation
A_e = influence area (also called effective or tributary area) of one column
$\Delta\sigma_s$ = vertical stress on the soil
$\Delta\sigma_c$ = vertical stress on the column
A_c = cross sectional area of the column

Dividing Equation (5.6) by A_e on both sides yields

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_s(1 - a_s) + \Delta\sigma_c a_s \qquad (5.7)$$

اصول: سختی پی مرکب حاصل از ستون و خاک اطراف

Considering the stress concentration ratio (i.e., $n = \Delta\sigma_c/\Delta\sigma_s$), Equation (5.7) can be rewritten as

$$\Delta\sigma_z = [(1 - a_s) + na_s]\,\Delta\sigma_s = [1 + (n - 1)a_s]\,\Delta\sigma_s \qquad (5.8)$$

The stress on the soil is

$$\Delta\sigma_s = \mu\,\Delta\sigma_z \qquad (5.9)$$

$$\mu = \frac{1}{1 + (n - 1)a_s} \qquad (5.10)$$

where μ is the stress reduction factor.

✓ همانگونه که ملاحظه می شود ضریب کاهش تنش همواره کوچکتر از یک است.

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

اصول: سختی پی مرکب حاصل از ستون و خاک اطراف

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_s(1 - a_s) + \Delta\sigma_c a_s$$

با فرض پی صلب و کرنش یکسان داریم:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s = \varepsilon_z$$

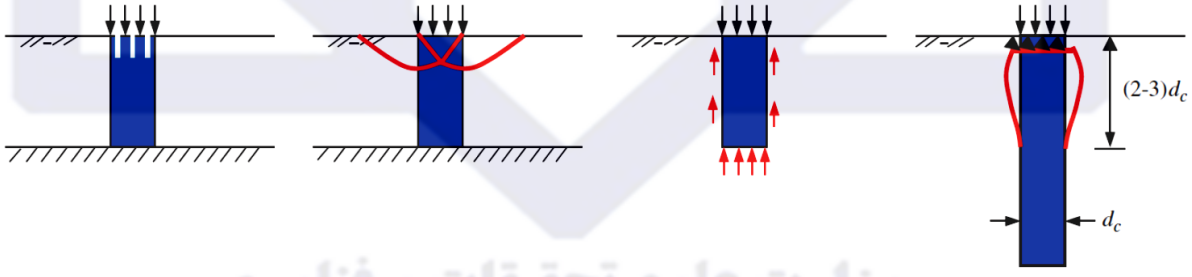
با تقسیم رابطه اول بر رابطه دوم داریم:

$$E_{eq} = E_s(1 - a_s) + E_c a_s$$

where E_{eq} = equivalent modulus of the composite foundation
E_s = soil modulus
E_c = column modulus

$$E_{eq} = [1 + (n - 1)a_s]E_s$$

اصول: مدهای خرابی در روش جایگزینی عمیق



crushing shear punching bulging

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

اصول: مدهای خرابی در روش جایگزینی عمیق

- ✓ خردشدگی زمانی که بار وارده بیش از مقاومت بتن است، بوجود می‌آید. این خرابی بیشتر در خصوص ستون های بتنی ترد تحت شرایط باربری نوک، مشاهده می شود.
- ✓ برش در ستون های سنگی امکان وقوع دارد.
- ✓ خرابی منگنه‌ای در ستون های سنگی کوتاه و ستون های بتنی بدون لایه باربر در نوک بوجود می‌آید.
- ✓ خرابی بادکردگی در ستون های سنگی اجرا شده در خاک های نرم احتمال وقوع دارد. این خرابی معمولاً در بخش فوقانی ستون (عمق ۲ تا ۳ برابر قطر) کشاهده می شود.

طراحی : مصالح خاکریزی در روش جابجایی لرزشی

$$S_N = 1.7\sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}}$$

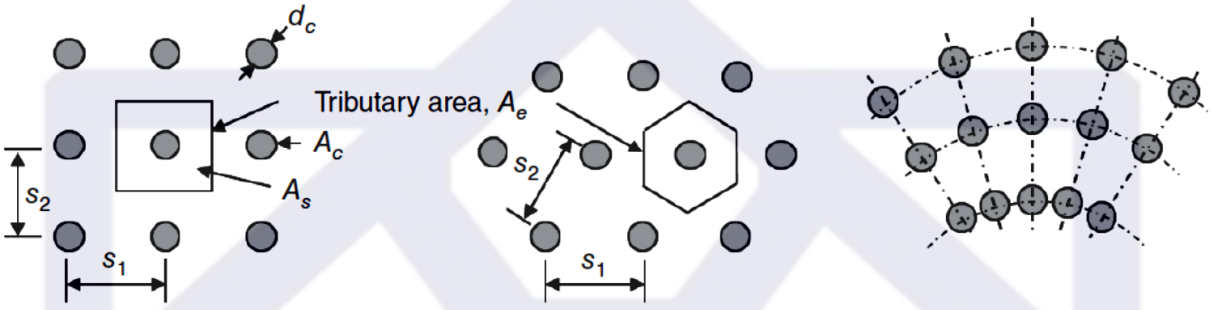
Where D_{50}, D_{20}, and D_{10} are particle sizes of 50%, 20%, and 10% finer, respectively, in a unit of mm.

Suitability Number	0–10	10–20	20–30	30–40	>50
Rating	Excellent	Good	Fair	Poor	Unsuitable

Source: Brown (1977).

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

طراحی : الگوی اجرا



(a) rectangular (b) triangular (c) radial.

الگوی شعاعی معمولاً برای پی‌های دایره‌ای و حلقه‌ای استفاده می‌شود.

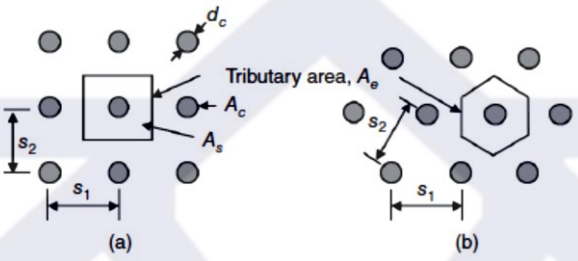
طراحی : قطر ستون

Column Type	Equipment for Installation	Diameter (m)
Sand compaction columns	Casing	0.6–0.8
Stone columns	Vibro-probe	0.5–1.2
Rammed aggregate columns	Auger and rammer	0.7–0.9
Vibro-concrete columns	Vibro-probe	0.5–0.6 (shaft) and 0.6–0.9 m (head and base)
Controlled modulus (stiffness) columns	Reverse flight auger	0.3–0.5
Geosynthetic-encased columns	Closed casing or open casing with auger	0.7–0.9

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

طراحی : قطر ستون



$$a_s = \frac{A_c}{A_e} = C\left(\frac{d_c}{s}\right)^2$$

where a_s = area replacement ratio
A_c = cross sectional area of the column
A_e = tributary area of the column
d_c = diameter of the column
s = center-to-center spacing between columns in a square or equilateral triangular pattern
C = constant ($\pi/4$ or 0.785 for a square pattern or $\pi/(2\sqrt{3})$ or 0.907 for an equilateral triangular pattern)

طراحی : قطر ستون

- ✓ نسبت مساحت جایگزینی برای ستون‌های سنگی بین ۰/۱ الی ۰/۴ است. نسبت‌های بزرگتر برای خاک‌های بسیار نرم یا سست استفاده می‌شود.
- ✓ نسبت مساحت جایگزینی برای ستون‌های سنگی محصور شده در داخل ژئوسینتتیک بین ۰/۱ الی ۰/۲ است.
- ✓ نسبت مساحت جایگزینی برای ستون‌های بتنی بین ۰/۰۵ الی ۰/۱۵ است.

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

طراحی : عمق بهسازی

- در صورت وجود بستر سخت در یک عمق کم، عمق بهسازی باید طوری انتخاب شود که به قشر سخت برسد.
- در صورت وجود بستر سخت در یک عمق زیاد، عمق بهسازی باید طوری انتخاب شود که نیازمندی‌های عملکردی مانند ظرفیت باربری، نشست، پایداری شیب و روانگرایی را تأمین کند.
- عمق بهسازی در این روش بین ۵ تا ۱۵ متر است.

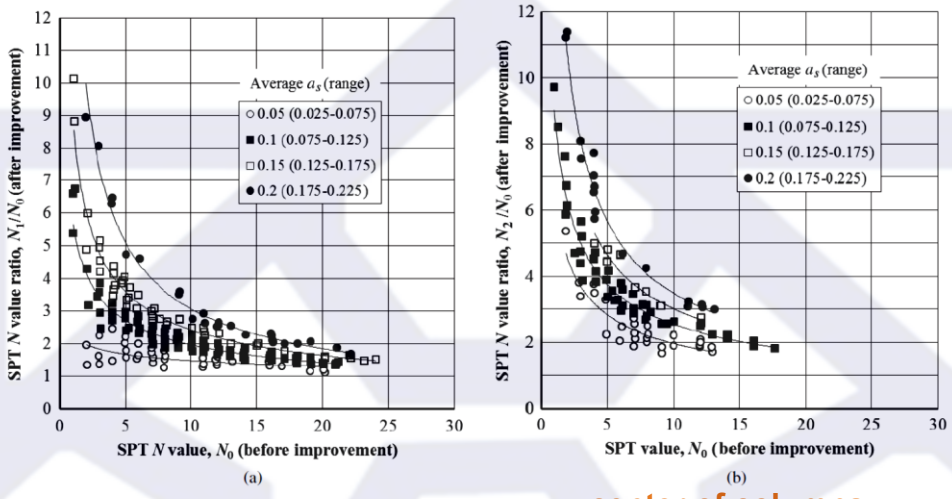
طراحی : محدوده بهسازی

- محدوده بهسازی باید بیش از مساحت پی باشد.
- در شرایط معمول، ۱ الی ۲ ستون باید خارج از ناحیه پی اجرا گردد.
- در صورت وجود پتانسیل روانگرایی، ۲ الی ۴ ستون باید خارج از ناحیه پی اجرا گردد.

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

طراحی : تأثیر تراکم لرزشی بر روی افزایش ظرفیت باربری خاک



Midway between columns

center of columns

طراحی : تأثیر تراکم لرزشی بر روی افزایش ظرفیت باربری خاک

$$N_{eq} = a_s N_2 + (1 - a_s) N_1$$

N_{eq} = average weighted (equivalent) SPT N value
N_1 = SPT N value in the surrounding soil
N_2 = SPT N value in the sand compaction column

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

طراحی : ظرفیت باربری نهایی پی مرکب حاصل از ستون های سنگی

$$q_{ult} = q_{ult,c} a_s + q_{ult,s}(1 - a_s)$$

$q_{ult,c} = 20c_u$ ظرفیت باربری ستون سنگی

$q_{ult,s} = 5c_u$ ظرفیت باربری خاک اطراف

طراحی : ظرفیت باربری نهایی ستون‌های بتنی

$$Q_{ult,c} = f_s A_s + q_t A_t$$

f_s = side friction
q_t = toe resistance
A_s = surface area of the column
A_t = toe cross-sectional area of the column

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

طراحی : ظرفیت باربری نهایی ستون‌های بتنی (اصطکاک جداره)

در حالت زهکشی نشده

$$f_s = \alpha c_u$$

α ضریب تصحیح فصل مشترک است که بین ۰/۵ الی ۱/۰ تغییر می کند. ضرایب کوچکتر برای حالت جایگزینی و ضرایب بزرگتر برای حالت جابجایی استفاده می‌شوند.

در حالت زهکشی شده

$$f_s = \beta_i \sigma'_{z0}$$

β_i = $K \tan \delta_i$
σ'_{z0} = effective overburden stress
K = coefficient of lateral earth pressure, typically ranging from 0.5 to 1.0 K_0 (a smaller constant may be used for a replacement method but a larger value may be used for a displacement method)
K_0 = coefficient of lateral earth pressure at rest
δ_i = interface friction angle, mostly equal to 0.8 to 1.0 times the soil effective friction angle, ϕ'

طراحی : ظرفیت باربری نهایی ستون‌های بتنی (مقاومت نوک)

در حالت زهکشی نشده

$$q_t = N_c^* c_u \approx 9 c_u$$

در حالت زهکشی شده

$$q_t = 0.5 d_c N_\gamma^* + \sigma'_D N_q^*$$

d_c = diameter of column
σ'_D = effective overburden stress at the depth of the column toe

N_γ^*, N_q^* are provided in Table 5.4

$\phi'(^\circ)$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46
N_γ^*	3.3	4.3	5.8	7.4	10	14	19	24	32	48	66	90	120	180
N_q^*	13	16	21	26	33	42	54	69	90	130	170	220	290	400

Sources: Vesic (1975) and Vesic (1977).

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

طراحی : ظرفیت باربری نهایی ستون‌های بتنی (کنترل مقاومت بتن)

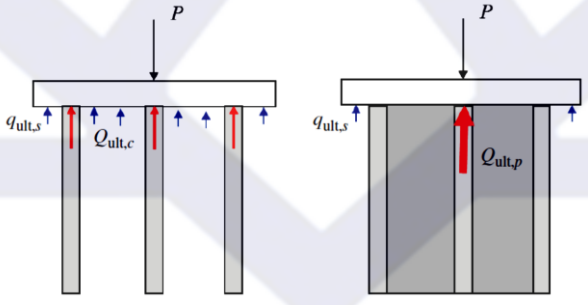
ظرفیت باربری نهایی ستون بتنی منفرد باید به مقاومت فشاری بتن محدود شود.

$$Q_{\text{ult},c} \le q_u A_c$$

q_u = unconfined compressive strength of the concrete (typically 20 MPa at 28 days)

A_c = cross-sectional area of the column head

طراحی : ظرفیت باربری نهایی پی مرکب حاصل ازستون‌های بتنی



کمترین مقدار از بین این دو مقدار

$$Q_{\text{ult}} = \sum Q_{\text{ult},ci} + q_{\text{ult},s} A_{\text{sr}}$$

$$Q_{\text{ult}} = Q_{\text{ult},p} + q_{\text{ult},s} A_{\text{so}}$$

Poulos (2001)

$Q_{\text{ult},ci}$ = individual column ultimate load capacity

$q_{\text{ult},s}$ = ultimate bearing capacity of soil

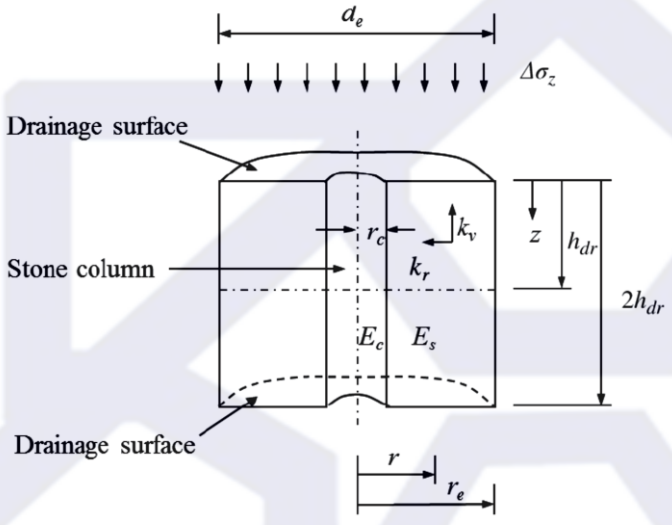
A_{sr} = area of soil under the raft

$Q_{\text{ult},p}$ = ultimate load capacity of the equivalent pier (the same above procedure used to calculate the ultimate load capacity of the pier by treating the pier as an individual column)

A_{so} = area of soil outside the periphery of the pier

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

طراحی : تحکیم



$$\frac{\partial e_s}{1+e_s} = \frac{\partial e_c}{1+e_c}$$

طراحی : تحکیم

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

$$c_{rm}=c_r\left(1+n\frac{1}{N_D^2-1}\right)=c_r\left(1+n\frac{a_s}{1-a_s}\right)$$

$$c_{vm}=c_v\left(1+n\frac{1}{N_D^2-1}\right)=c_v\left(1+n\frac{a_s}{1-a_s}\right)$$

c_r = the coefficient of consolidation of soft soil in the radial direction, i.e., $k_r/(\gamma_w m_{v,s})$
c_{rm} = the modified coefficient of consolidation of soft soil in the radial direction
c_v = the coefficient of consolidation of soft soil in the vertical direction, i.e., $k_v/(\gamma_w m_{v,s})$
k_v = permeability of the soil in the vertical direction
k_r = permeability of the soil in the radial direction
γ_w = unit weight of water
u = excess pore water pressure at a distance r
N_D = the diameter ratio, defined as the ratio of the influence diameter (d_e) to the column diameter ($d_c = 2r_c$) in a unit cell, and
n = stress concentration ratio at the end of consolidation. This stress concentration ratio can be estimated using Figure 5.14 but should be limited to not more than 5.0.
$m_{v,s}$ = volumetric compressibility of the soil in the vertical direction

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

طراحی : تحکیم

The Terzaghi one-dimensional solution can be used for the vertical flow while the Barron solution (Barron, 1948) can be used for the radial flow.

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

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

طراحی : تحکیم

Terzaghi (1943)

$$\text{For } U_v = 0 \text{ to } 52.6\%, \quad U_v = \sqrt{\frac{4T_v}{\pi}}$$
$$\text{For } U_v > 52.6\%, \quad U_v = 1 - 0.81 \times 10^{-1.07T_v}$$

U_v = average degree of consolidation due to vertical flow, and
T_v = time factor due to vertical flow (i.e., $T_v = c_v t/h^2_{dr}$, t is time and h_{dr} is longest drainage distance due to vertical flow)

For granular column-reinforced foundations, the modified coefficient of consolidation of soft soil in the vertical direction, c_{vm}, can be used to calculate the time factor for Terzaghi's solution for the degree of one-dimensional consolidation, as $T_{vm} = c_{vm} t/h^2_{dr}$.

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

طراحی : تحکیم

Barron (1948)

$$U_r = 1 - e^{-\frac{8}{F(N_D)}T_r}, \quad F(N_D) = \frac{N_D^2}{N_D^2 - 1}\ln(N_D) - \frac{3N_D^2 - 1}{4N_D^2}$$

U_r = *average degree of consolidation due to radial flow*
N_D = *diameter ratio (i.e., ND = d_e/d_c)*
d_e = *equivalent diameter of a unit cell*
d_c = *diameter of a sand drain; and*
T_r = *time factor due to radial flow, (i.e., $T_r = c_{rt}/d^2_e$).*

The modified coefficient of consolidation of soft soil in the radial direction, c_{rm}, can be used to calculate the time factor for Barron's solution (Barron,1948) for the degree of radial consolidation as $T_{rm} = c_{rm}t/d^2e$.

طراحی : تحکیم

- Suitable for compressible silts and clays (undrained shear strength, c_u = 15 – 50 kPa)
- Typical spacing 1.5 - 3.5 m
- Typical diameter 0.8 - 1.1 m
- Typical depth 10 - 15 m (max. 30 m)
- Replacement ratio 0.2 - 0.4
- Stress concentration ratio 2 – 5 (rigid footing)
  1.5 to 3.0 (embankment)
- Settlement improvement factor 1.5 - 6
- Column loads < 500 kN/column

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

پارامترهای تیپ طراحی برای ستونهای سنگدانه‌ای کوبیده شده

- Soils most favorable: soft clays with cu > 15 kPa
- Typical diameter: 0.7 - 0.9 m
- Typical length: 5 - 10 m
- Typical allowable load capacity: 200-600 kN
- Settlement < 25 mm

پارامترهای تیپ طراحی برای ستونهای بتنی

- Typical column diameters: 450-600 mm
- Typical allowable design loads: 600-1300 kN
- Soils most favorable: very soft clays and organic soils
- Typical length: 10 -15 m

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

پارامترهای تیپ طراحی برای ستونهای سنگی محصور شده

- Soils most favorable: very soft clays and organic soils
- Typical length: 5-10 m
- Typical column diameter: 0.5-0.9 m
- Typical allowable load capacity: 150-350 kN

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان