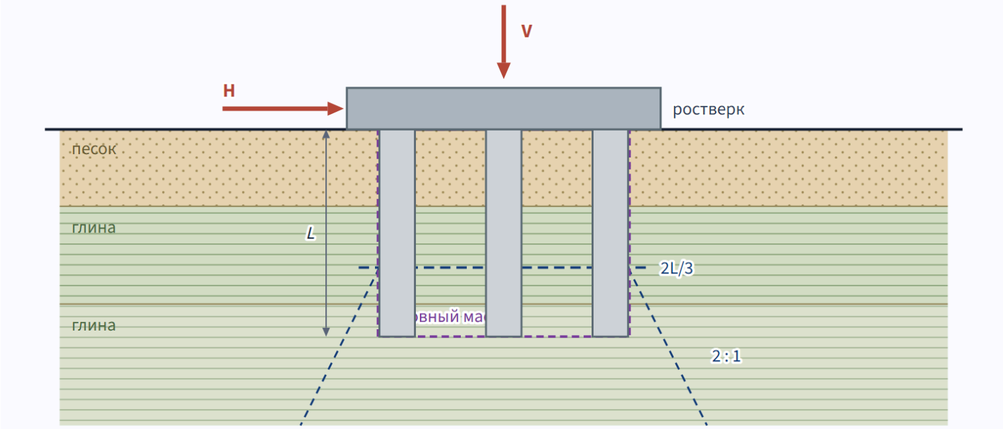
Презентация лекции по геотехнике · Свайные фундаменты

Расчёт куста свай

Лекция: куст свай под ростверком — нагрузка на каждую сваю, несущая способность, осадка и поведение при горизонтальной нагрузке; по каждой теме приведён пример расчёта.

- Жёсткий ростверк
- Коэффициент кустового эффекта · блок
- Осадка
- Горизонтальная нагрузка: p-множители
- Примеры расчёта



Что мы изучим на этой лекции?

- Определение **нагрузки на каждую сваю** под жёстким ростверком и выявление сваи, работающей на растяжение
- Послойный расчёт несущей способности **одиночной сваи** как основы для несущей способности куста свай
- Применение **коэффициента кустового эффекта** (Converse–Labarre, Los Angeles, Seiler–Keeney; правила для забивных и буровых свай в песке) послойно
- Проверка группы на **блочное разрушение** и выбор **меньшего** значения
- Расчёт упругой (Vesic) и **консолидационной** осадки (распределение 2:1)
- Интерпретация p-множителей и неодинаковых долей нагрузки рядов при **горизонтальной нагрузке**

ХОД ЛЕКЦИИ

Каждая тема излагается **в три шага**:

1 · **Теория**: в чём правило и почему оно таково?

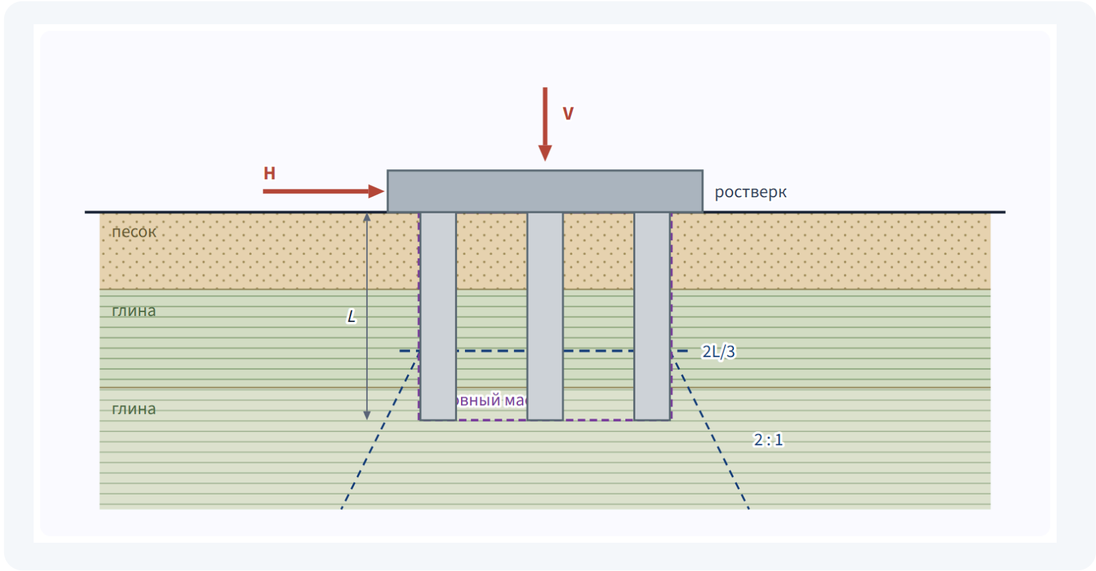
2 · **Условие**: дано и требуется определить

3 · **Решение**: пошагово, с числами

Данная презентация опирается на презентацию о **свае в слоистом грунте**: послойный расчёт одиночной сваи изложен там, здесь же рассматривается её место в составе куста.

Что изменяется при совместной работе свай?

ТЕОРИЯ



Сваи располагаются рядами под **ростверком**; когда они стоят близко друг к другу, грунт между ними и вокруг них вынужден работать на все сваи одновременно. Меняются три вещи, и модуль рассматривает каждую как отдельную проверку:

Несущая способность: грунт между сваями получает напряжения от боковой поверхности каждой сваи; каждая свая воспринимает меньшую нагрузку, чем в одиночном положении (коэффициент эффективности η < 1). Если грунт слабый, а сваи расположены близко, куст и грунт между ними могут также разрушаться как единый **блок**.

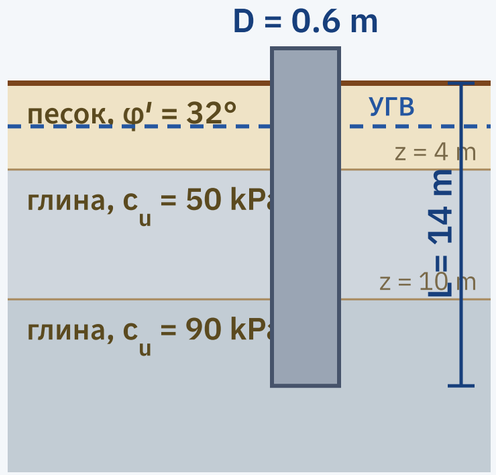
Осадка: нагрузка от группы распределяется не по площади одной сваи, а по **площади всей группы** и достигает слоёв глины, расположенных значительно ниже концов свай; группа оседает значительно больше, чем одиночная свая.

Горизонтальная нагрузка: задние ряды работают в грунте, который сдвинут и деформирован предыдущими сваями; передний ряд воспринимает большую нагрузку, остальные — меньшую.

Группа, используемая на протяжении всей лекции

Пример куста (модель, с которой открывается модуль)

Сваи	**9 буровых свай (диаметр D = 0.60 m, длина L = 14 m), 3 ряда × 3 сваи, подошва ростверка в грунте**
Шаг	$s_x = s_y = 1.80$ m $(3.0\,D)$
Грунт	**песок 0–4 m (φ′ = 32°), глина 4–10 m (c_u = 50), глина 10–18 m (c_u = 90 kPa); γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³**
Грунтовые воды	**на глубине 2.0 m**
Нагрузки	$V = 1\,600$ kN, $H = 900$ kN, $M_y = 900$ kN·m
Материал, надёжность	$E_p = 30\,000$ MPa, $E_s = 30$ MPa, $\nu_s = 0.30$; $FS = 3$



Большинство примеров выполнено для этой группы; результаты совпадают с числами на вкладке **Модель** модуля.

Жёсткий ростверк: сваи представляют собой одинаковые пружины

ТЕОРИЯ

Ростверк принимается жёстким, а сваи — одинаковыми вертикальными пружинами. Жёсткий ростверк перемещается как **плоскость**: единственные неизвестные — его осадка и повороты. Поэтому нагрузка на каждую сваю является **линейной** функцией её положения (правило болтовой группы):

$$P_i = \frac{V}{n} + B\,x_i + C\,y_i$$

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} \qquad C = \frac{M_x}{\sum y^2} \qquad \left(\sum xy = 0\right)$$

$$\sum x^2 = n_y s_x^2\,\frac{n_x(n_x^2-1)}{12}$$

Если M_y положителен, он добавляет давление на стороне **+x** (сторона, на которую давит горизонтальная нагрузка, передняя сторона). Моменты берутся **относительно подошвы ростверка**: нагрузка H на высоте h над подошвой даёт $M_y = H\,h$.

Если сваи расположены в шахматном (треугольном) порядке, Σxy не равно нулю; модуль берёт суммы по положениям свай и решает два уравнения совместно.

Наибольшая нагрузка приходится на передние сваи, наименьшая — на задние; **при большом моменте** задняя свая может оказаться растянутой.

Условие

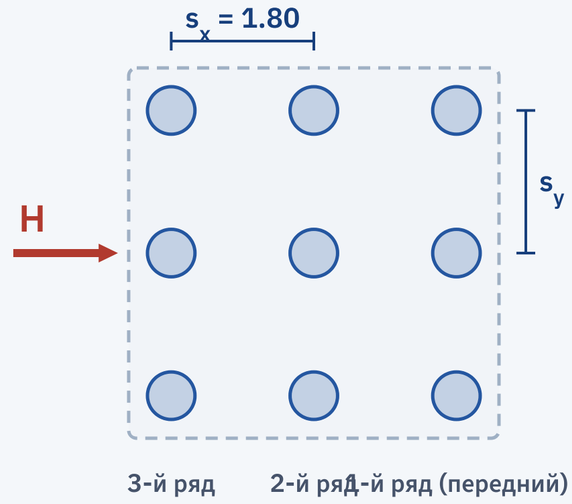
ПРИМЕР

Дано

Группа	**9 буровых свай, 3 ряда × 3 сваи, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Грунт	**песок 0–4 m (φ′ = 32°) · глина 4–10 m (c_u = 50) · глина 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Нагрузки	$V = 1\,600$ kN, $M_y = 900$ kN·m **(y подошвы ростверка)**
Заголовок	**жёсткий; сваи одинаковые**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Найти нагрузку на **каждую сваю**. Ряды нумеруются **спереди** (перед = сторона, в которую толкает горизонтальная нагрузка, +x).



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Равные доли

$$\frac{V}{n} = \frac{1\,600}{9} = \mathbf{177.8}\ \text{kN}$$

2 Σx² (симметричный куст, замкнутая форма)

$$\sum x^2 = n_y s_x^2 \, \frac{n_x(n_x^2-1)}{12} = 3(1.8)^2 \, \frac{3(9-1)}{12} = \mathbf{19.44}\ \text{m}^2$$

3 Коэффициент момента (C = 0, так как $M_X = 0$)

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} = \frac{900}{19.44} = \mathbf{46.30}\ \text{kN/m}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

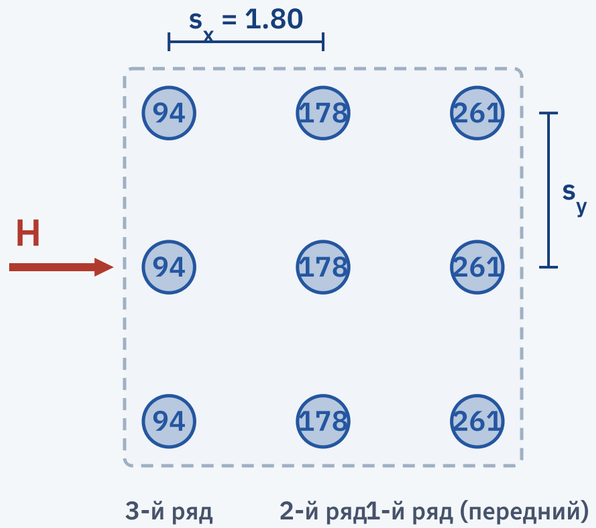
4 Нагрузки по рядам: P = V/n + B x (x = +1.8; 0; −1.8 m)

$$P_1 = 177.8 + 46.30(1.8) = \mathbf{261.1}\ \text{kN (передний)}$$

$$P_2 = \mathbf{177.8}\ \text{kN}$$

$$P_3 = 177.8 - 46.30(1.8) = \mathbf{94.4}\ \text{kN (задняя)}$$

Итого: 3(261.1 + 177.8 + 94.4) = **1,600 kN** = V. Наибольшая нагрузка приходится на передние сваи (261.1 kN), наименьшая — на задние (94.4 kN); **ни одна свая не работает на растяжение**.



Проверить решение в GeoTerva ↗

При большом моменте задние сваи работают на растяжение

ТЕОРИЯ

Если момент велик по сравнению с вертикальной нагрузкой, сваи на стороне, противоположной моменту, **разгружаются** и могут оказаться растянутыми. Растяжению свая сопротивляется **только боковой поверхностью**: в слое глины — полным значением, в слое песка — **тремя четвертями** сопротивления при сжатии; нижний конец ничего не даёт.

$$T_u = \sum_i \chi_i \, Q_{s,i} \qquad \chi = 1 \text{ (глина)},\ \chi = 0.75 \text{ (песок)}$$

$$T_g = \min(T_{ind},\, T_{block}) \quad T_{ind} = n_T \sum_i \eta_i \chi_i Q_{s,i}$$

Одиночная свая, работающая на выдергивание: $T_{max} \le T_u/FS$. Сваи, работающие на выдергивание, **совместно**: $\Sigma T \le T_g/FS$; блок удерживается собственным весом и сдвиговым сопротивлением по боковым граням.

ПРОВЕРКА НА СЖАТИЕ

$$P_{max} \le \frac{Q_u}{FS}$$

Наибольшая нагрузка на сваю сравнивается с допускаемой нагрузкой на **одиночную сваю**; групповой эффект здесь не учитывается. При действии момента наиболее нагруженная свая воспринимает больше V/n и может превысить свою долю **даже тогда, когда куст в целом находится в пределах своей несущей способности**.

Условие

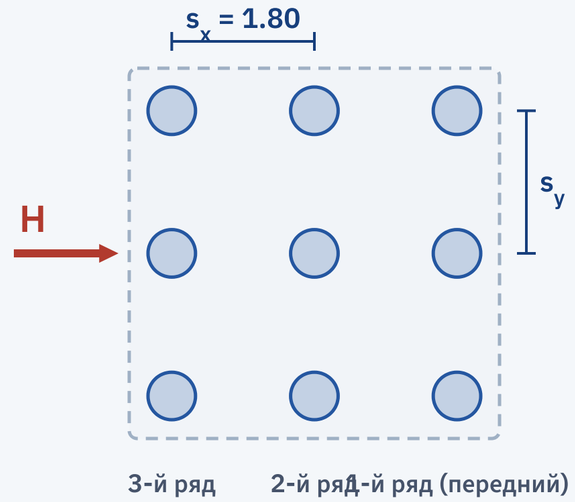
ПРИМЕР

Дано

Группа	**9 буровых свай, 3 ряда × 3 сваи, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Грунт	**песок 0–4 m (φ′ = 32°) · глина 4–10 m (c_u = 50) · глина 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Нагрузка	$V = 1\,600$ kN, **момент увеличен:** $M_y = 2\,400$ kN·m
Одиночная свая	**Вклады Q_s (пример 3): песок 49.8, глина 311.0, глина 317.2 kN**
Эффективность	**песок 0.767, глина 0.727 (примеры 5–6)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Найти нагрузки; проверить при FS = 3 несущую способность растянутой сваи и **совместную** несущую способность растянутых свай.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Нагрузки ($B = M_y/\Sigma x^2$)

$$B = \frac{2\,400}{19.44} = 123.46 \text{ kN/m}$$

$$P_{front} = 177.8 + 123.46(1.8) = \mathbf{400.0} \text{ kN}$$

$$P_{rear} = 177.8 - 123.46(1.8) = -\mathbf{44.4} \text{ kN (растяжение)}$$

2 Несущая способность одиночной сваи на выдергивание (песок × 0.75, глина × 1)

$$T_u = 0.75(49.8) + 311.0 + 317.2 = \mathbf{665.6} \text{ kN} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_u}{FS} = 221.9 \text{ kN}$$

Свая, работающая на выдергивание: T_{max} = **44.4 kN** ≤ T_u/FS = 221.9 kN → **достаточно**.

Число свай, работающих на выдергивание, равно 3 (задний ряд), суммарное растягивающее усилие ΣT = 133.3 kN; проверка куста — на следующем шаге.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Суммарная несущая способность 3 свай, работающих на выдергивание: сумма эффективных участков боковой поверхности × 3

$$T_{ind} = 3\left[\eta_s \chi_s Q_{s1} + \eta_c Q_{s2} + \eta_c Q_{s3}\right] = \mathbf{1{,}456}\ \text{kN}$$

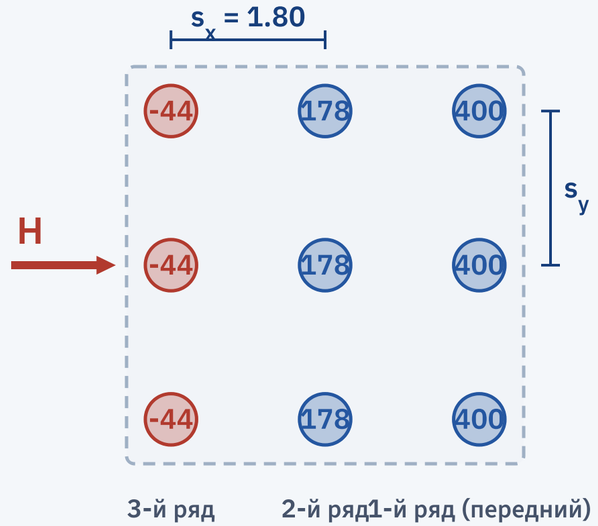
4 Блок выдергивания (3 сваи, L_t = D = 0.6 m, B_t = 4.2 m): сопротивление по боковой поверхности + вес блока

$$T_{block} = \sum \tau_i P_t \Delta L_i + W = 6{,}692 + 369 = \mathbf{7{,}061}\ \text{kN}$$

5 Проверка: наименьшее значение и FS

$$T_g = \min(1{,}456;\ 7{,}061) = 1{,}456\ \text{kN}$$

$$\sum T = 133.3 \le \frac{T_g}{3} = 485\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{достаточно}$$



Проверить решение в GeoTerva ↗

Несущая способность куста свай определяется на основе несущей способности одиночной сваи

ТЕОРИЯ

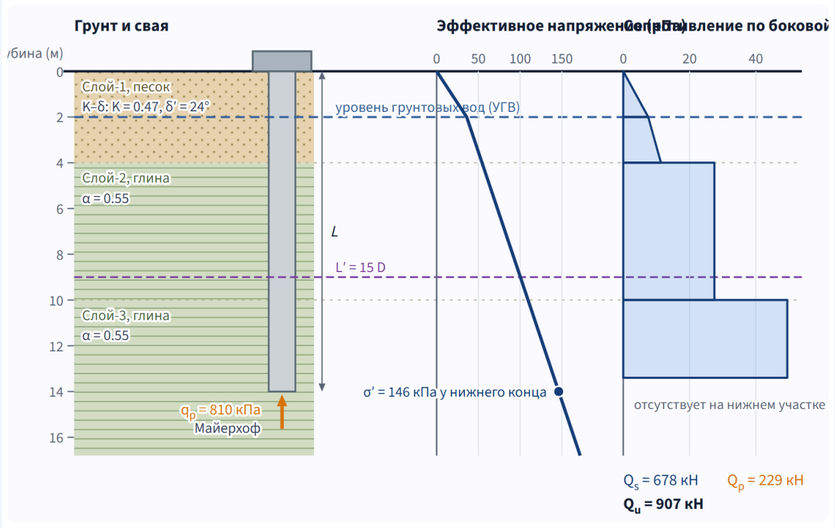
Сначала вычисляется сопротивление **одиночной** сваи из куста: каждый слой — по правилу для своего материала, **заданное сопротивление не используется**. Правила те же, что в презентации *свая в слоистом грунте*:

$$Q_u = Q_s + Q_p \qquad Q_s = p\sum_i f_i\,\Delta L_i \qquad Q_p = A_b\,q_p$$

Песок: f = Kσ′tanδ′ (критическая глубина L′ = 15D). Для буровой сваи **K = K_0 = 1 − sinφ'**, δ′ = 0.75φ′; для забивной K = 1.4K_0.

Глина: α, λ или β. Для буровой сваи **α* = 0.55** ($c_u/p_a \le 1.5$) и α* = 0 на протяжении **верхних 1.5 m и нижней части длиной 1D**.

Нижний конец: правило слоя, в котором находится конец: в песке $q'N^*_q \le q_l$, в глине $9c_u$ (для буровой сваи можно выбрать Reese–O'Neill).



Условие

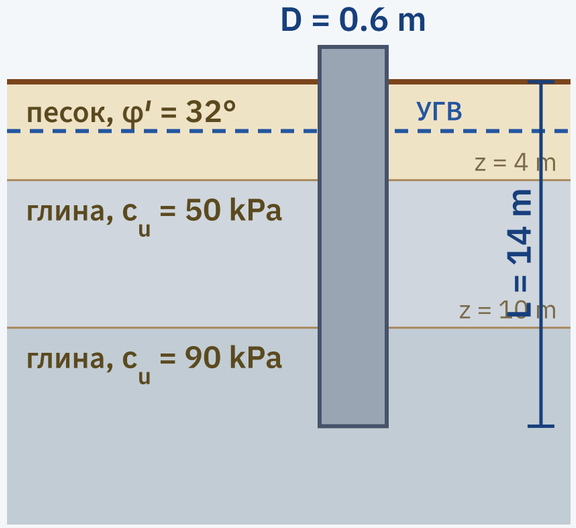
ПРИМЕР

Дано

Группа	**9 буровых свай, 3 ряда × 3 сваи, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Грунт	**песок 0–4 m (φ′ = 32°) · глина 4–10 m (c_u = 50) · глина 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Организация	**буровая свая: K = K_0 = 0.47, δ′ = 0.75φ′ = 24°, α* = 0.55; нижний конец: Meyerhof**
Грунтовые воды	**2.0 m**
Удельный вес	$\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19$ kN/m^3

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить сопротивление **боковой поверхности** одиночной сваи по слоям, сопротивление **нижнего конца** и значение **Q_u**; выполнить проверку $P_{max} \le Q_u/FS$.



Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

1 Песок (0–4 m): L′ = 15D = 9 m > 4 m, ограничения нет; σ′(2) = 18(2) = 36.0 и σ′(4) = 36.0 + (19 − 9.81)(2) = 54.4 kPa

$$\bar{\sigma}' = \frac{126.4}{4} = 31.6 \text{ kPa}$$

$$f = K \tan\delta' \, \bar{\sigma}' = 0.47(0.4452)(31.6) = 6.61 \text{ kPa}$$

$$Q_{s1} = p \, f \, H = 1.885(6.61)(4) = \mathbf{49.8} \text{ kN}$$

Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

2 Глина (4–10 m): α* = 0.55 (c_u/p_a = 0.5 ≤ 1.5); окно 1.5 → L − D = 13.4 m полностью охватывает слой

$$f = 0.55(50) = 27.5 \text{ kPa} \qquad Q_{s2} = 1.885(27.5)(6) = \mathbf{311.0} \text{ kN}$$

3 Глина (10–14 m): окно заканчивается на 13.4 m → отбрасывается нижний участок 1D = 0.6 m, эффективная длина 13.4 − 10 = 3.4 m

$$f = 0.55(90) = 49.5 \text{ kPa} \qquad Q_{s3} = 1.885(49.5)(3.4) = \mathbf{317.2} \text{ kN}$$

Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

4 Сумма по боковой поверхности и нижний конец (слой у нижнего конца: глина, c_u = 90 kPa, Meyerhof N^*_c = 9)

$$Q_s = 49.8 + 311.0 + 317.2 \approx \mathbf{678.1}\ \text{kN}$$

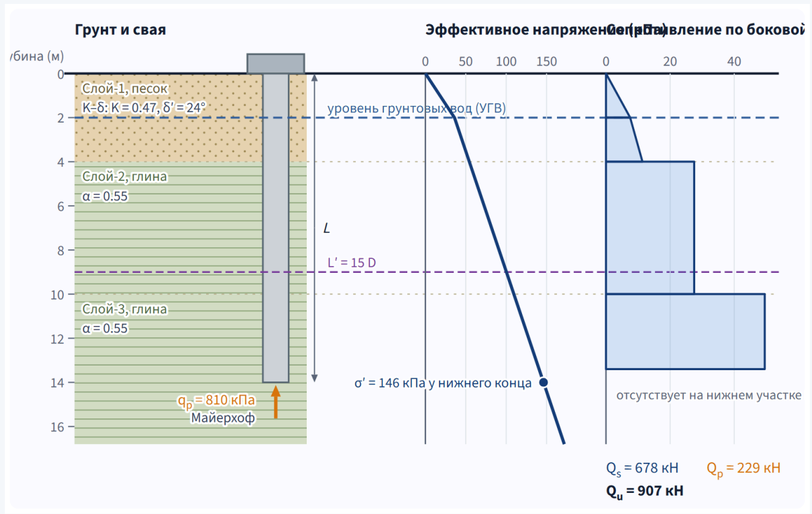
$$q_p = 9(90) = 810\ \text{kPa}$$

$$Q_p = A_b q_p = 0.2827(810) = \mathbf{229.0}\ \text{kN}$$

5 Несущая способность одиночной сваи и проверка

$$Q_u = 678.1 + 229.0 = \mathbf{907.1}\ \text{kN}$$

$$\frac{Q_u}{FS} = 302.4\ \text{kN} \geq P_{max} = 261.1\ \text{kN} \Rightarrow \text{достаточно}$$



Проверить решение в GeoTerva ↗

Близко расположенные сваи воспринимают меньшую нагрузку, чем каждая по отдельности

ТЕОРИЯ

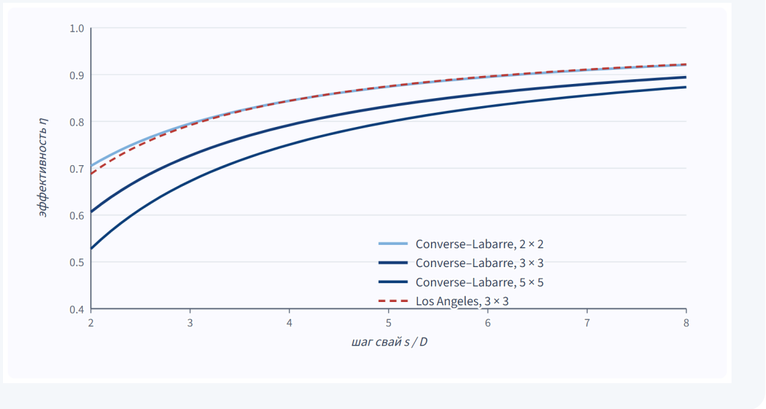
По мере сближения свай грунты, срезаемые и деформируемые каждой сваей, перекрываются. **Коэффициент кустового эффекта** — отношение несущей способности куста к сумме несущих способностей одиночных свай. Источник приводит три эмпирических уравнения для куста из $n_1 \times n_2$ свай диаметром D с шагом d:

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u}$$

$$\eta_{CL} = 1 - \frac{\theta}{90}\,\frac{(n_1-1)n_2 + (n_2-1)n_1}{n_1 n_2}, \quad \theta = \tan^{-1}\frac{D}{d}\ \text{(градус)}$$

Формула Converse–Labarre учитывает **пары соседних свай**: $(n_1 - 1)n_2$ пар друг за другом, $(n_2 - 1)n_1$ пар бок о бок; для каждой берётся угол $\theta = \tan^{-1}(D/d)$, соответствующий собственному расстоянию.

Модуль применяет это уравнение для глины; им уменьшается сопротивление по боковой поверхности в слоях глины и сопротивление под нижним концом сваи, находящимся в глине.



С увеличением шага коэффициент кустового эффекта приближается к 1; в кусте 3 × 3 при шаге около 3D он составляет 0.7 – 0.8.

Остальные два уравнения и пределы

ТЕОРИЯ

Остальные два уравнения источника также относятся к прямоугольной группе. Уравнение **Los Angeles** и уравнение **Seiler–Keeney** (d в **ft**):

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{D}{\pi d\, n_1 n_2}\left[n_1(n_2-1) + n_2(n_1-1) + \sqrt{2}(n_1-1)(n_2-1)\right]$$

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11d}{7(d^2-1)}\,\frac{n_1+n_2-2}{n_1+n_2-1}\right] + \frac{0.3}{n_1+n_2}$$

Seiler–Keeney имеет полюс при 1 ft и теряет смысл при значениях менее 2 ft; модуль выдаёт его начиная с **2 ft**.

Шаг менее 2.5D **помечается**: это наименьший шаг, который источник приводит для висячих свай, а уравнения записаны для больших шагов.

В треугольной схеме расстановки формула Converse–Labarre записывается подсчётом соседних пар; это **расширение модуля**, и оно даёт меньший коэффициент кустового эффекта, чем сетка при том же шаге.

Условие

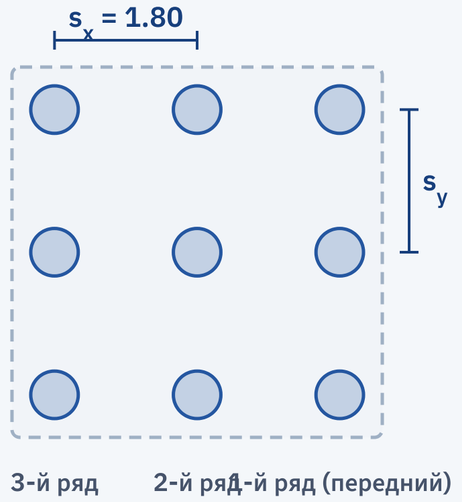
ПРИМЕР

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить коэффициент кустового эффекта по уравнениям **Converse–Labarre**, **Los Angeles** и **Seiler–Keeney**.

Дано

Группа	**3 × 3 сваи, D = 0.60 m, шаг d = 1.80 m (в обоих направлениях)**
Seiler–Keeney	**d в футах: 1.80 m = 5.906 ft**



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Converse–Labarre: θ = tan⁻¹(D/d); соседние пары: (2)(3) + (2)(3) = 12

$$\theta = \tan^{-1}\frac{0.6}{1.8} = 18.43^\circ \;;\quad \eta_{CL} = 1 - \frac{18.43}{90}\cdot\frac{12}{9} = \mathbf{0.727}$$

2 Los Angeles

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{0.6}{\pi(1.8)(9)}\left[3(2) + 3(2) + \sqrt{2}(2)(2)\right] = \mathbf{0.792}$$

3 Seiler–Keeney (d = 5.906 ft)

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11(5.906)}{7(5.906^2 - 1)}\cdot\frac{4}{5}\right] + \frac{0.3}{6} = \mathbf{0.831}$$

Три уравнения дают значения в диапазоне 0.727 – 0.831. В глине модуль использует **Converse–Labarre** (0.727).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Коэффициент кустового эффекта в песке: правило, а не уравнение

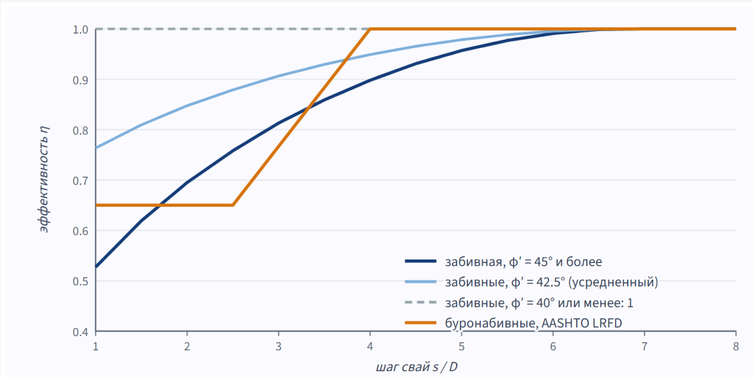
ТЕОРИЯ

Забивная свая **уплотняет** рыхлый или среднеплотный песок; в таком песке куст воспринимает нагрузку, равную сумме нагрузок отдельных свай (в испытаниях — даже больше). Лишь в плотном песке (φ′ > около 40°) близкое расположение свай снижает несущую способность. Для забивной сваи модуль берёт график источника и **никогда не принимает коэффициент кустового эффекта выше 1**:

- φ′ ≤ 40°: **η = 1**
- 40° < φ′ < 45°: **линейная интерполяция** между 1 и кривой для 45°
- φ′ ≥ 45°: кривая для 45° (1.0 при s/D = 7; 0.53 при s/D = 1)

Буровая свая не уплотняет грунт, а может даже разрыхлять его. AASHTO LRFD умножает сопротивление каждой буровой сваи в кусте на **0.65** при s/D = 2.5 и на **1.0** при 4:

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{s/D - 2.5}{1.5} \qquad 2.5 \le s/D \le 4$$



Коэффициент кустового эффекта для слоя песка применяется к боковой поверхности сваи в этом слое и к сопротивлению под нижним концом сваи, основание которой находится в песке. Шаг: **наименьшее расстояние между двумя сваями**.

Условие

ПРИМЕР

Дано

Шаг	**s = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3.0**
Буровая свая	**правило AASHTO для песка**
Забивная свая	**песок, $\varphi' = 42^\circ$ (кривая 45° при s/D = 3: $\eta_{45} = 0.813$)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить коэффициент кустового эффекта для слоя песка в случае **буровой** сваи и в случае **забивной** сваи в песке с φ′ = 42°; что изменится при φ′ = 35°?

Решение

РЕШЕНИЕ

1 Буровая свая (AASHTO): s/D = 3.0

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{3.0 - 2.5}{1.5} = \mathbf{0.767}$$

2 Забивная свая, φ′ = 42°: вес w = (φ′ – 40)/5 и кривая 45°

$$w = \frac{42 - 40}{5} = 0.4 \qquad \eta = 1 - w(1 - \eta_{45}) = 1 - 0.4(1 - 0.813) = \mathbf{0.925}$$

3 Забивная свая, φ′ = 35°

$$\varphi' \le 40^\circ \;\Rightarrow\; \eta = \mathbf{1.000}$$

В том же диапазоне **буровая** свая в песке принимает значение 0.767, а **забивная** (в рыхлом–среднем песке) — 1.00: забивка уплотняет, бурение не уплотняет.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Модуль деформации каждого слоя равен модулю деформации соответствующего грунта

ТЕОРИЯ

Ствол сваи делится по границам слоёв, и каждый участок рассчитывается своим методом. Групповой эффект, относящийся к грунту, также следует применять **по участкам**: коэффициент кустового эффекта для слоя равен коэффициенту этого грунта, а **нижний конец** принимает коэффициент того грунта, на который опирается:

$$Q_{ind} = n \left(\sum_i \eta_i \, Q_{s,i} + \eta_b \, Q_p \right)$$

$$\eta_{group} = \frac{Q_{ind}}{\sum Q_u}$$

Слои **глины** и основание сваи, нижний конец которой расположен в глине: Converse–Labarre.

Слой **песка**: номограмма для забивных свай, правило AASHTO для буровых.

Коэффициент кустового эффекта — **не вводимое значение**, а **средневзвешенная величина** по вкладам слоёв: свая, получающая основную часть своей нагрузки от песка, отражает групповой эффект этого песка, а висячая в глине свая — групповой эффект глины.

Условие

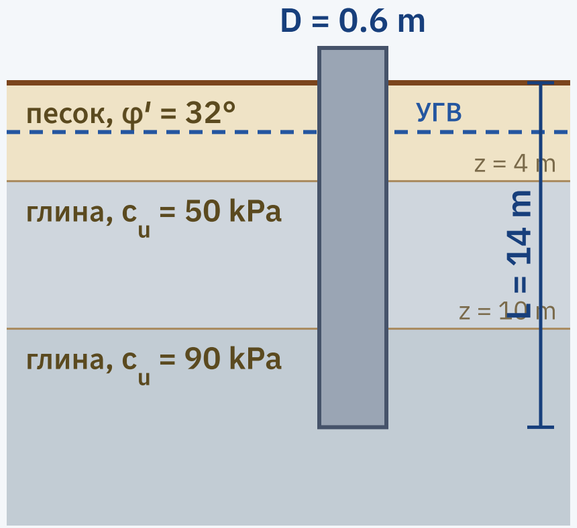
ПРИМЕР

Дано

Одиночная свая (Пример 3)	**Q_{s1} = 49.8 (песок), Q_{s2} = 311.0, Q_{s3} = 317.2 (глина), Q_p = 229.0 kN**
Коэффициенты эффективности	**песок (буровая, s/D = 3): 0.767; глина: 0.727; нижний конец (глина): 0.727**
Группа	**9 свай**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Что такое Q_{ind} и **коэффициент кустового эффекта** $\eta = Q_{ind}/\Sigma Q_u$?



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Эффективный вклад каждой части (η Q): боковая поверхность в песке, боковая поверхность в глине 1, боковая поверхность в глине 2, нижний конец

$$0.767(49.8) = 38.2\ ; \quad 0.727(311.0) = 226.1$$
$$0.727(317.2) = 230.6\ ; \quad 0.727(229.0) = 166.5$$

2 Эффективная несущая способность одной сваи и куст

$$\sum \eta Q = 38.2 + 226.1 + 230.6 + 166.5 = \mathbf{661.4}\ \text{kN}$$
$$Q_{ind} = 9(661.4) \approx \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

3 Коэффициент кустового эффекта

$$\eta = \frac{Q_{ind}}{n\,Q_u} = \frac{5{,}952}{9(907.1)} = \mathbf{0.729}$$

Куст воспринимает **73%** суммы несущих способностей свай, работающих по отдельности (песок η = 0.767, глина η = 0.727).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Куст может разрушиться как фундамент глубокого заложения

ТЕОРИЯ

Если сваи расположены близко, куст и грунт между ними могут смещаться вниз **совместно**: условный глубокий фундамент размерами $L_g \times B_g$ и глубиной L. Его несущая способность равна сумме **сопротивления сдвигу** по четырём граням и **несущей способности** под подошвой:

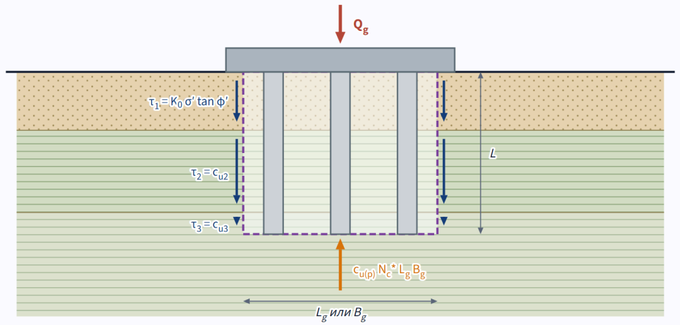
$$Q_{block} = \sum_i \tau_i \, P_b \, \Delta L_i + q_b \, L_g B_g \qquad P_b = 2(L_g + B_g)$$

Боковая грань глины: $\tau = c_u$ (грунт скользит по грунту, не снижается коэффициентом α).

Боковая грань в песке (расширение модуля относительно источника): $\tau = K_0 \sigma' \tan\varphi'$, $K_0 = 1 - \sin\varphi'$.

Глинистое основание: $q_b = c_u N^*_c$; N^*_c по номограмме, в зависимости от L/B_g и L_g/B_g. **Песчаное основание**: nQ_p.

$$Q_{g(u)} = \min(Q_{ind},\, Q_{block}) \qquad Q_{all} = \frac{Q_{g(u)}}{FS}$$



Условие

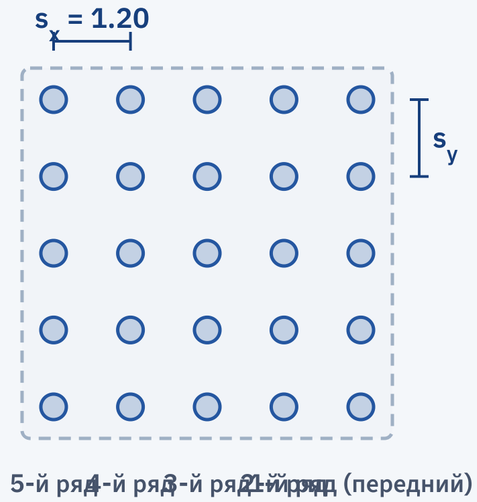
ПРИМЕР

Дано

Группа	**9 буровых свай, 3 ряда × 3 сваи, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Грунт	**песок 0–4 m (φ′ = 32°) · глина 4–10 m (c_u = 50) · глина 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Блок	**$L_g = B_g = (3 - 1)(1.8) + 0.6$**
Боковые грани	**песок: $\tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi'$ ($\bar{\sigma}'$ = 31.6 kPa); глина: $\tau = c_u$**
Подошва	**глина, c_u = 90 kPa; N^*_c по графику (L_g/B_g = 1)**
Индивидуальный	**Q_{ind} = 5,952 kN (пример 6); V = 1,600 kN, FS = 3**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить значение Q_{block}, несущую способность куста и допустимую нагрузку на него.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Размеры блока и периметр

$$L_g = B_g = 4.2 \text{ m} \qquad P_b = 2(L_g + B_g) = \mathbf{16.8} \text{ m}$$

2 Сдвиг по боковым граням (τ P_b ΔL)

$$\text{песок}: \tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(31.6)(0.6249) = 9.28 \;\Rightarrow\; 624 \text{ kN}$$

$$\text{глина 1}: \tau = 50 \;\Rightarrow\; 50(16.8)(6) = 5{,}040 \text{ kN}$$

$$\text{глина 2}: \tau = 90 \;\Rightarrow\; 90(16.8)(4) = 6{,}048 \text{ kN}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Основание: N^*_c по номограмме для $L/B_g = 14/4.2 = 3.33$ и $L_g/B_g = 1$

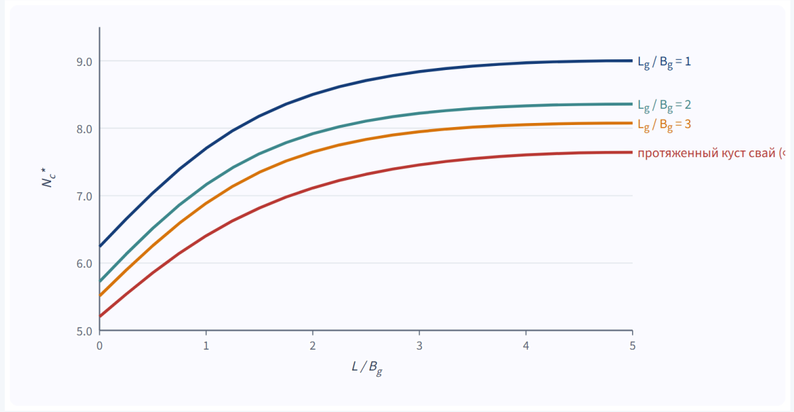
$$q_b L_g B_g = c_u N_c^* \, L_g B_g = 90(8.90)(17.64) = \mathbf{14{,}126}\ \text{kN}$$

4 Несущая способность блока, несущая способность куста и допускаемая нагрузка

$$Q_{block} = 11{,}712 + 14{,}126 = 25{,}838\ \text{kN}$$

$$Q_{g(u)} = \min(5{,}952;\ 25{,}838) = \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

$$Q_{all} = \frac{5{,}952}{3} = 1{,}984\ \text{kN} \geq V = 1\,600\ \text{kN}$$



Несущая способность блока **более чем в 4 раза** превышает сумму для отдельных свай: в этой группе **определяющими являются отдельные сваи** (индивидуальный режим). Блок вступает в работу в группах с близко расположенными многочисленными сваями; рядом приведена номограмма.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

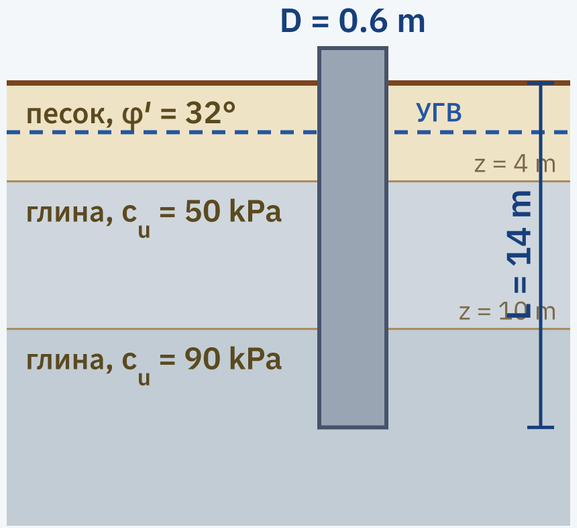
ПРИМЕР

Дано

Группа	**5 × 5 забивных свай, D = 0.40 m, s = 1.20 m (3D), L = 12 m**
Грунт	**однородный песок, φ′ = 32°, γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³, УГВ 3 m**
Одиночная свая	**Q_s = 285.7, Q_p = 318.0 kN (забивная, K–δ и Meyerhof)**
Эффективность	**забивная свая, в песке при φ′ < 40°: η = 1**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Сравнить значения Q_{ind} и Q_{blok} и найти несущую способность куста свай.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Одиночные сваи (η = 1)

$$Q_{ind} = n\,Q_u = 25(603.7) = \mathbf{15{,}094}\ \text{kN}$$

2 Блок: $L_g = B_g = 4(1.2) + 0.4 = 5.2$ m; σ′(3) = 54.0, σ′(12) = 136.7 kPa

$$P_b = 2(5.2 + 5.2) = 20.8\ \text{m} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{939.2}{12} = 78.3\ \text{kPa}$$

$$\tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(78.3)(0.6249) = 22.99\ \text{kPa}$$

$$\text{боковой сдвиг} = 22.99(20.8)(12) = \mathbf{5{,}738}\ \text{kN}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Основание блока в песке: сопротивление основания равно сумме сопротивлений под нижними концами свай

подошва $= nQ_p = 25(318.0) = \mathbf{7{,}950}$ kN $\qquad Q_{block} = 5{,}738 + 7{,}950 = \mathbf{13{,}689}$ kN

4 Несущая способность куста и коэффициент кустового эффекта

$$Q_{block} = 13{,}689 \; < \; Q_{ind} = 15{,}094$$

$$Q_{g(u)} = \mathbf{13{,}689} \text{ kN} \qquad \eta_{group} = \frac{13{,}689}{15{,}094} = \mathbf{0.907}$$

Здесь **определяющим является блок**: в большом кусте суммарное сопротивление свай по боковой поверхности превышает сопротивление сдвигу по внешнему периметру куста. Хотя для каждой сваи по отдельности η = 1.00, несущая способность куста составляет **91%** от суммы по отдельным сваям.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Vesic: три части, затем куст

ТЕОРИЯ

Одиночная свая оседает за счёт укорочения собственной длины, сжатия грунта под нижним концом и сжатия грунта, нагружаемого по боковой поверхности. Vesic (1969) суммирует эти три составляющие для рабочей нагрузки Q_w (Q_{ws} — доля боковой поверхности, Q_{wp} — доля нижнего конца):

$$s_e = s_{e1} + s_{e2} + s_{e3}$$

$$s_{e1} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p E_p} \qquad s_{e2} = \frac{q_{wp} D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{wp}$$

$$s_{e3} = \frac{Q_{ws}}{pL}\frac{D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{ws} \qquad I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{L/D}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e$$

Рабочая нагрузка $Q_w = V/n$; модуль распределяет её между боковой поверхностью и нижним концом сваи в отношении **$Q_s : Q_p$**.

Куст оседает в **$\sqrt{(B_g/D)}$** раз больше, чем одиночная свая при той же нагрузке на сваю (эмпирическая зависимость Vesic для свай в песке).

ξ: распределение сопротивления по боковой поверхности, от 0.5 (равномерное) до 0.67 (возрастающее с глубиной); $I_{wp} = 0.85$.

Условие

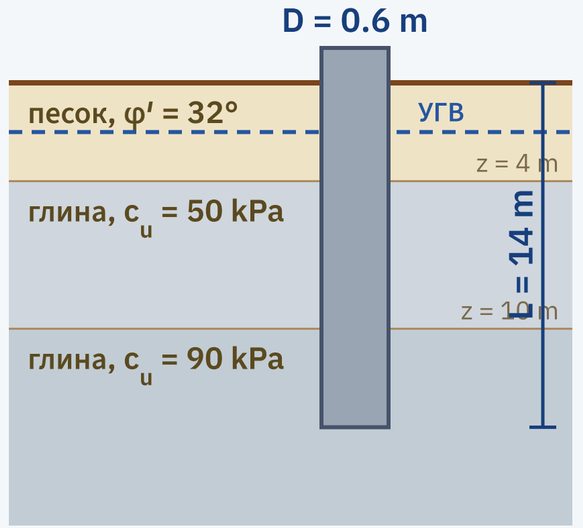
ПРИМЕР

Дано

Группа	**9 буровых свай, 3 ряда × 3 сваи, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Грунт	**песок 0–4 m (φ′ = 32°) · глина 4–10 m (c_u = 50) · глина 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Рабочая нагрузка	**Q_w = V/n = 177.8 kN; Q_s : Q_p = 678.1 : 229.0 (Пример 3)**
Материал	$E_p = 30\,000$ MPa, $E_s = 30$ MPa, $\nu_s = 0.30$, $\xi = 0.6$, $I_{wp} = 0.85$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить упругую осадку одиночной сваи по трём составляющим и упругую осадку **куста**.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Распределение рабочей нагрузки

$$Q_{ws} = Q_w \frac{Q_s}{Q_u} = 177.8 \frac{678.1}{907.1} = 132.9 \text{ kN} \qquad Q_{wp} = 177.8 - 132.9 = 44.9 \text{ kN}$$

2 Укорочение сваи

$$s_{e1} = \frac{(44.9 + 0.6(132.9))(14)}{(0.2827)(30\,000\,000)} = 0.21 \text{ mm}$$

3 Подошва

$$q_{wp} = \frac{Q_{wp}}{A_b} = 158.7 \text{ kPa} \quad s_{e2} = \frac{158.7(0.6)}{30\,000}(1 - 0.3^2)(0.85) = 2.46 \text{ mm}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

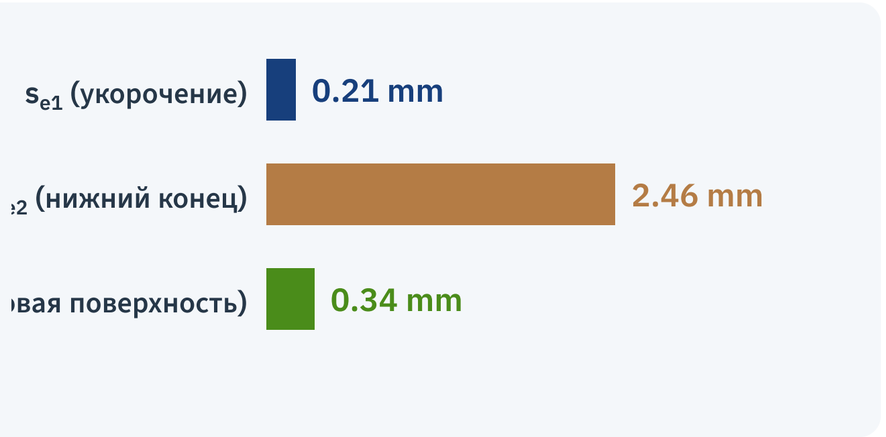
4 Боковая поверхность: $I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{(14/0.6)} = 3.69$

$$s_{e3} = \frac{132.9}{(1.885)(14)} \cdot \frac{0.6}{30\,000}(0.91)(3.69) = 0.34 \text{ mm}$$

5 Одиночная свая и куст свай

$$s_e = 0.21 + 2.46 + 0.34 \approx 3.00 \text{ mm}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e = \sqrt{\frac{4.2}{0.6}}(3.00) = \mathbf{7.9} \text{ mm}$$



82% осадки приходится на составляющую от подошвы (s_{e2}); суммарная упругая осадка — **7.9 mm**. Основная осадка глинистых слоёв рассматривается на следующем шаге: консолидация.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Медленная и значительная осадка глинистых слоёв

ТЕОРИЯ

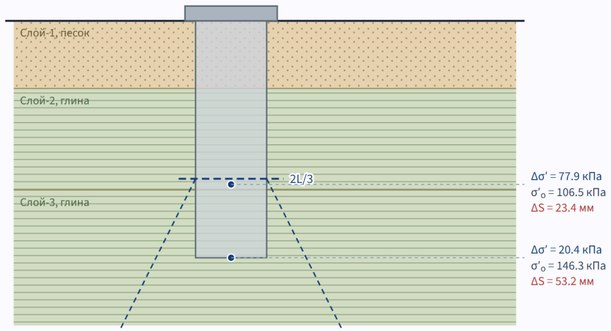
Глины под ростверком оседают медленно и преимущественно **за счёт консолидации**. Источник прикладывает нагрузку куста от уровня ростверка к эквивалентному фундаменту **на 2L/3 ниже** (сваи передали часть нагрузки вышележащему грунту) и распределяет её вниз по схеме **2 вертикаль : 1 горизонталь**. В середине слоя глины, на z ниже уровня 2L/3, добавочное напряжение:

$$\Delta\sigma'_i = \frac{Q_g}{(B_g + z_i)(L_g + z_i)}$$

$$\Delta S_i = \frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_i}{\sigma'_o} \quad \text{(NC)}$$

В переуплотнённой глине C_s (C_c/5, если не задан) используется до давления предварительного уплотнения, а за его пределами — C_c.

В расчёт входит часть слоя глины, расположенная **ниже** 2L/3; σ'_o принимается в середине этой части с учётом слоя и уровня воды. $S_c = \Sigma\Delta S_i$.



Условие

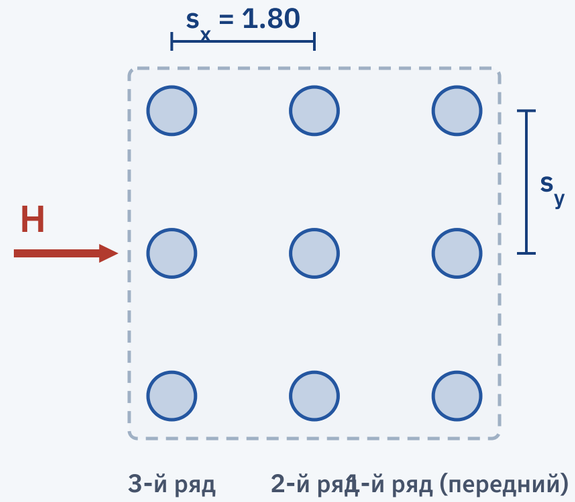
ПРИМЕР

Дано

Группа	**9 буровых свай, 3 ряда × 3 сваи, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Грунт	**песок 0–4 m (φ′ = 32°) · глина 4–10 m (c_u = 50) · глина 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Нагрузка	$Q_g = V = 1\,600$ kN; **блок** $L_g = B_g = 4.2$ m
Глина 1 (4–10 m)	$e_0 = 0.90,\ C_c = 0.28$ **(NC)**
Глина 2 (10–18 m)	$e_0 = 0.70,\ C_c = 0.20$ **(NC)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Найти уровень 2L/3 и рассчитать осадку **каждого слоя глины** (его части ниже уровня 2L/3) и полную консолидационную осадку.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Уровень 2L/3 (от подошвы ростверка)

$$z_0 = \frac{2L}{3} = \frac{2(14)}{3} = \mathbf{9.33}\ \text{m} \ \Rightarrow$$ часть глины 1 на 9.33–10 m и вся глина 2 учитываются в расчёте

2 Глина 1 (4–10 m): 9.33–10 m, H = 0.67 m; средняя точка 9.67 m, z = 0.33 m

$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+0.33)(4.2+0.33)} = 77.9\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 106.5\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.28(0.67)}{1+0.90}\log\frac{106.5+77.9}{106.5} = \mathbf{23.4}\ \text{mm}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Глина 2 (10–18 m): 10.00–18 m, H = 8.00 m; середина 14.00 m, z = 4.67 m

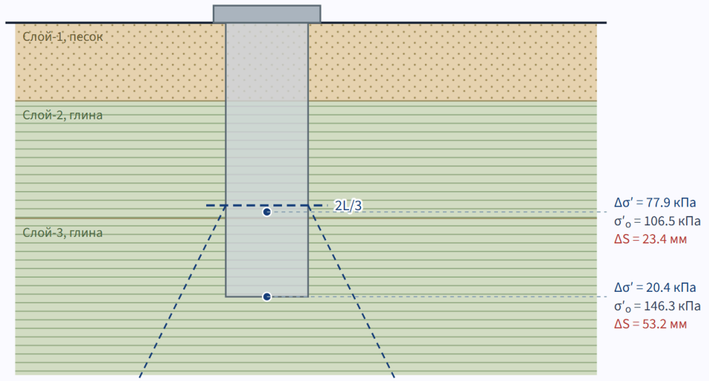
$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+4.67)(4.2+4.67)} = 20.4 \text{ kPa} \qquad \sigma'_o = 146.3 \text{ kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.20(8.00)}{1+0.70}\log\frac{146.3+20.4}{146.3} = \mathbf{53.2} \text{ mm}$$

4 Полная консолидационная осадка и её сочетание с упругой составляющей

$$S_c = 23.4 + 53.2 = \mathbf{76.7} \text{ mm}$$

$$S = S_{g(e)} + S_c = 7.9 + 76.7 = \mathbf{84.6} \text{ mm}$$



91 % осадки приходится на консолидацию, а 69 % от неё — на глины на глубине 10–18 m: осадка группы определяется толстым слоем глины, залегающим **значительно ниже** концов свай; осадка одиночной сваи этого не показывает.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Задние ряды находятся в «тени» передних

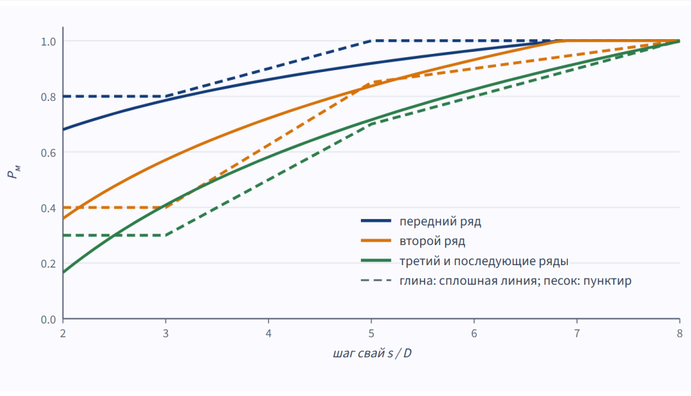
ТЕОРИЯ

При горизонтальной нагрузке свая вдавливается в грунт, и грунт реагирует по длине сваи (кривая p–y в модуле расчёта на горизонтальную нагрузку). Когда сваи стоят **друг за другом** в направлении нагрузки, каждая из них работает в грунте, напряжённом и вытесненном впереди стоящей сваей. Опыты (Brown и др. 1988; McVay и др. 1995; Rollins и др. 2006) показывают, что кривая p–y в группе сохраняет свою форму, но снижается с помощью **p-множителя P_m**; множитель зависит от номера ряда и расстояния между сваями:

$$p_{group}(y) = P_m \, p_{single}(y)$$

глина (Rollins):

$$P_{m1} = 0.26 \ln \frac{s}{D} + 0.5$$
$$P_{m2} = 0.52 \ln \frac{s}{D}$$
$$P_{m3} = 0.60 \ln \frac{s}{D} - 0.25$$



Песок: множители AASHTO LRFD (при 3D и 5D: 0.8·0.4·0.3 и 1.0·0.85·0.7; между ними — линейно).

В слоистом грунте кривая p–y **каждого слоя** масштабируется множителем, соответствующим типу грунта этого слоя. Если нагрузка **меняет направление**, то для каждого ряда принимается среднее значение множителей рядов группы.

Условие

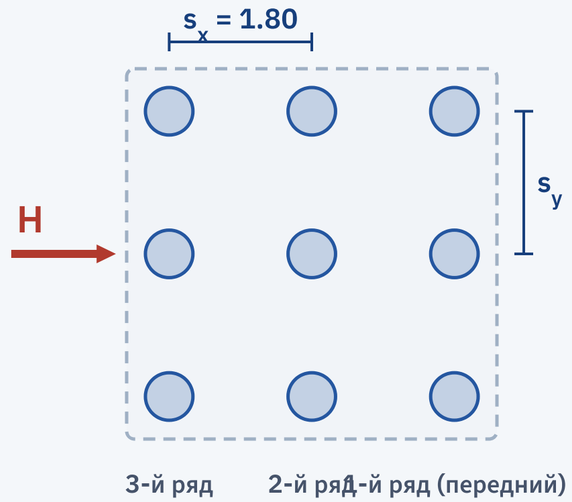
ПРИМЕР

Дано

Шаг (в направлении нагрузки)	s_x = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3
Глина	Уравнения Rollins и др. (2006)
Песок	AASHTO LRFD: в 3D P_m = 0.8 · 0.4 · 0.3

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить **p-множители** трёх рядов для слоя глины; каков средний множитель рядов для глины и песка, если нагрузка **изменяет направление на обратное**?



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Глина: ln(s/D) = ln 3 = 1.099

$$P_{m1} = 0.26(1.099) + 0.5 = \mathbf{0.786}$$

$$P_{m2} = 0.52(1.099) = \mathbf{0.571}$$

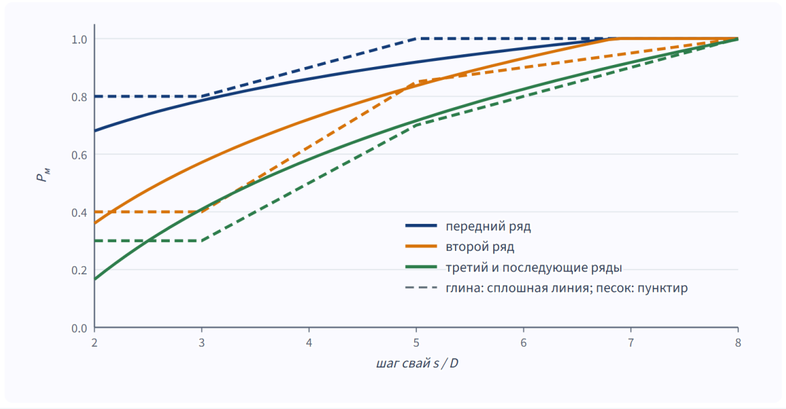
$$P_{m3} = 0.60(1.099) - 0.25 = \mathbf{0.409}$$

2 Знакопеременная нагрузка: среднее значение по рядам

$$\bar{P}_{m,clay} = \frac{0.786 + 0.571 + 0.409}{3} = \mathbf{0.589}$$

$$\bar{P}_{m,sand} = \frac{0.8 + 0.4 + 0.3}{3} = \mathbf{0.500}$$

Передний ряд сохраняет около 79 % кривой, третий и последующие ряды — лишь 41 % (в глине); в песке — 80 % и 30 %. По мере увеличения расстояния между сваями множители приближаются к 1 (при 5D для песка 1.0 · 0.85 · 0.7).



Проверить решение в GeoTerva ↗

Ростверк получает единое перемещение

ТЕОРИЯ

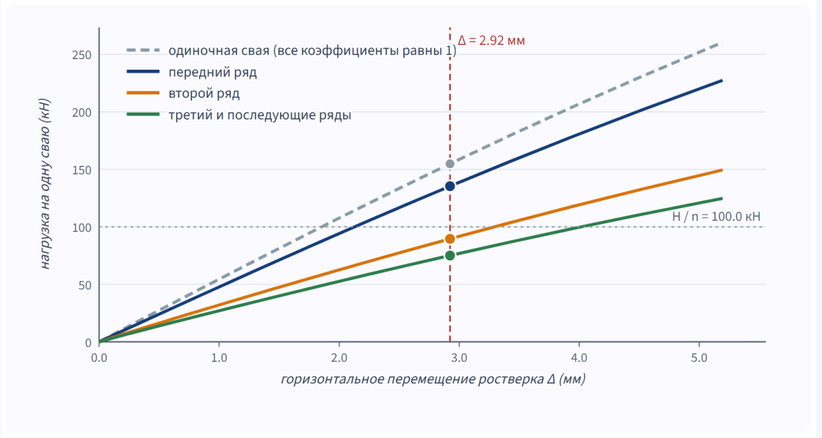
Ростверк жёсткий, его поворот стеснён: **оголовок каждой сваи смещается на одно и то же Δ**; однако, поскольку кривые p–y масштабируются по-разному, ряды воспринимают разные нагрузки. Модуль находит Δ, при котором сумма нагрузок рядов равна нагрузке на ростверк:

$$\sum_{k=1}^{n_x} n_y \, H_k(\Delta) = H$$

Свая в k-м ряду — это одиночная свая из **модуля расчёта сваи на горизонтальную нагрузку** (конечные элементы + метод Newton); её кривые масштабируются множителями этого ряда.

Перемещение **контролируется**: голова сваи удерживается на Δ, и считывается её реакция; таким образом можно проследить и пик кривой с разупрочнением (циклическая глина).

Наибольшая нагрузка, которую может воспринять куст, — **первый пик** суммы по рядам; если требуемая нагрузка превышает её, модуль сообщает об этом.



Условие

ПРИМЕР

Дано

Решение (модуль)	**Δ = 2.92 mm; нагрузка на сваю: 1-й ряд 135.3, 2-й ряд 89.6, 3-й ряд 75.1 kN**
Одиночная свая	**Воспринимает 154.8 kN при Δ; под нагрузкой 100 kN перемещается на 1.85 mm**
Нагрузка	**H = 900 kN, n = 9: равная доля H/n = 100 kN**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Проверить равновесие; найти отношение перемещения ростверка к перемещению одиночной сваи и **коэффициент кустового эффекта при горизонтальной нагрузке**.

Решение

РЕШЕНИЕ

1 Равновесие: $\Sigma n_\gamma H_k = H$

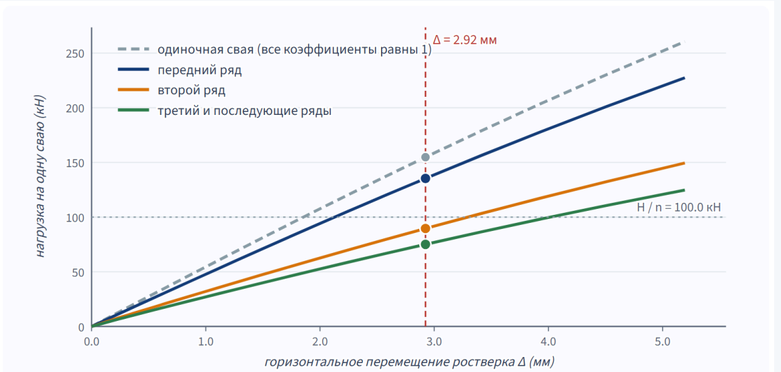
$$3(135.3 + 89.6 + 75.1) = \mathbf{900}\ \text{kN} = H\ \checkmark$$

2 Отношение перемещения ростверка к перемещению одиночной сваи

$$\frac{\Delta}{y_{single}} = \frac{2.92}{1.85} = \mathbf{1.58}$$

3 Коэффициент кустового эффекта при горизонтальной нагрузке: средняя нагрузка на сваю / нагрузка на одиночную сваю при том же Δ

$$\eta_{lateral} = \frac{H/n}{H_{single}(\Delta)} = \frac{100.0}{154.8} = \mathbf{0.65}$$



Передний ряд воспринимает нагрузку, в **1.35 раза** превышающую равную долю, третий ряд — 0.75 равной доли; ростверк перемещается в **1.58 раза** больше, чем в случае одиночной сваи. Наибольший изгибающий момент — в голове сваи: 207 kN·m.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Какое значение относится к какой проверке?

ТЕОРИЯ

Нагрузки на сваи: $P_{max} \le Q_u/FS$ (одиночная свая, без группового эффекта); свая, работающая на выдергивание, $T_{max} \le T_u/FS$, а сваи, работающие на выдергивание, совместно — $\Sigma T \le T_g/FS$

Несущая способность куста: $V \le Q_{all} = Q_{g(u)}/FS$; какая из схем (отдельные сваи или блок) является определяющей

Осадка: упругая + консолидационная, сравнивается с заданным допустимым значением

Горизонтальная нагрузка: перемещение ростверка, нагрузка на передний ряд, наибольший изгибающий момент и коэффициент эффективности при горизонтальной нагрузке; сравнивается с допускаемым перемещением

Нагрузка на сваю и изгибающий момент — это нагрузки для **конструктивного расчёта** сечения сваи

ПРИМЕР ГРУППЫ: ПРОВЕРКИ

Проверка	Результат
$P_{max} \le Q_u/FS$	261 ≤ 302 kN ✓
$V \le Q_{all}$	1 600 ≤ 1,984 kN ✓
Осадка	84.6 mm
Δ (боковое)	2.92 mm

Условие

ПРИМЕР

Дано

Группа	**9 буровых свай, 3 ряда × 3 сваи, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Грунт	**песок 0–4 m (φ′ = 32°) · глина 4–10 m (c_u = 50) · глина 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Переменный	**шаг свай s = 2.5D · 3D · 4D · 5D · 6D (в обоих направлениях)**
Нагрузки	**V = 1 600, H = 900 kN, M_y = 900 kN·m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Как меняются несущая способность куста, коэффициент кустового эффекта и перемещение ростверка при увеличении расстояния между сваями?

Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

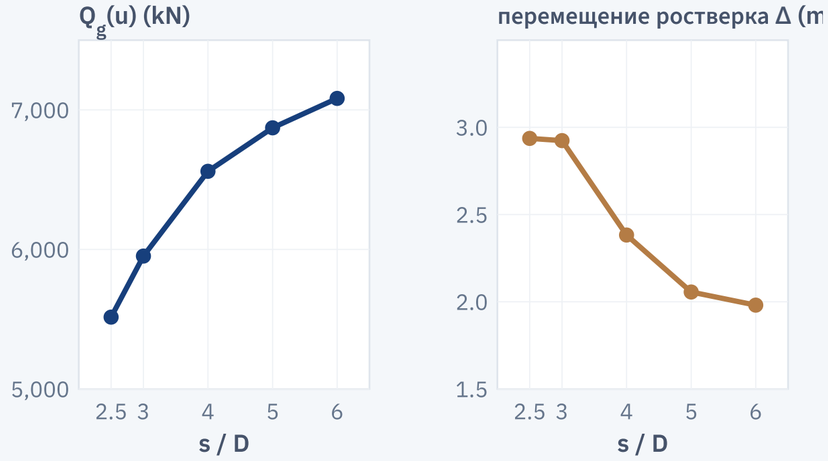
s / D	s (m)	η песок	η глина	$Q_{g(u)}$ (kN)	η группа	Δ (mm)
2.5	1.50	0.65	0.677	5,515	**0.676**	2.94
3.0	1.80	0.77	0.727	5,952	**0.729**	2.92
4.0	2.40	1.00	0.792	6,560	**0.803**	2.38
5.0	3.00	1.00	0.832	6,871	**0.842**	2.06
6.0	3.60	1.00	0.860	7,083	**0.868**	1.98

s = 2.5D → 6D: несущая способность **5,515 → 7,083 kN**, коэффициент кустового эффекта 0.68 → 0.87, перемещение ростверка **2.94 → 1.98 mm**. По мере увеличения шага и коэффициент кустового эффекта, и p-множители приближаются к 1; 2.5D — наименьший шаг, указанный в источнике.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

Комментарий. Увеличение шага с 2.5D до 6D повышает несущую способность на 28 % и уменьшает перемещение ростверка на 33 %; но ростверк увеличивается, а сваи расходятся дальше. На практике принимается компромисс между 3D – 3.5D и 5D. На графике слева — $Q_{g(u)}$, справа — Δ.



Проверить решение в GeoTerva ↗

Допущения, лежащие в основе чисел

ТЕОРИЯ

Куст: вертикальные сваи, расположенные в прямоугольной сетке или в треугольном порядке, одного сечения и длины, под жёстким ростверком. Ростверк передаёт нагрузку, но сопротивления не добавляет (пассивное давление, трение под ним и несущая способность оставляются в запас).

Одиночная свая: действуют правила для слоистого грунта, никакие сопротивления не вводятся.

Коэффициент кустового эффекта: эмпирические уравнения для забивных свай в глине; в песке — один шаг (наименьшее расстояние). Для треугольной схемы расстановки Converse–Labarre является **расширением**.

Блок: в глине — основа источника; сдвиг в песке и подошва в песке — **расширение модуля**.

Нагрузки: V включает вес ростверка; горизонтальная нагрузка и моменты приложены на уровне подошвы ростверка. При выдергивании учитывается только боковая поверхность, для песка ¾.

Осадка — опция; упругая составляющая определяется с единственными значениями E_s и ν_s, консолидационная — при распространении напряжений 2:1, в середине каждого слоя.

Горизонтальная нагрузка: множители p получены из испытаний на определённых грунтах и при определённых расстояниях; значения при расстояниях менее 3D отмечаются.

Резюме

Главное

Жёсткий ростверк: **P = V/n + Bx + Cy**; наибольшая нагрузка — на передней свае, наименьшая — на задней; при большом моменте задняя свая работает на **растяжение**

Одиночная свая рассчитывается послойно; несущая способность куста строится на её основе

Коэффициент кустового эффекта применяется послойно: Converse–Labarre в глине, номограмма для забивных свай в песке ($\eta \leq 1$) и правило AASHTO для буровых свай

Несущая способность = **min(индивидуальная, блочная)**; расчёт по блоку становится определяющим в кустах с малым шагом и большим числом свай

Осадка: упругая (Vesic, с $\sqrt{(B_g/D)}$) + консолидационная (рассеивание 2:1 от 2L/3); осадка куста определяется толстым слоем глины

Горизонтальная нагрузка: множители p убывают от переднего ряда к заднему; ростверк получает единое перемещение Δ, ряды воспринимают неодинаковые нагрузки

Список литературы

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, Boston.

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228.

Vesic, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board, Washington.

Coyle, H.M. and Castello, R.R. (1981). New design correlations for piles in sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT7), 965–986.

Mansur, C.I. and Hunter, A.H. (1970). Pile tests, Arkansas River project. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1545–1582.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.

Vijayvergiya, V.N. and Focht, J.A. (1972). A new way to predict capacity of piles in clay. Proceedings of the 4th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1718.

Burland, J.B. (1973). Shaft friction of piles in clay — a simple fundamental approach. Ground Engineering, 6(3), 30–42.

O’Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration, Washington.

Reese, L.C. and O’Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-HI-88-042, Federal Highway Administration, Washington; сопротивление под нижним концом буронабивной сваи в глине.

Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

Kishida, H. and Meyerhof, G.G. (1965). Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 2, 270–274.

Vesic, A.S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand. Performance of Deep Foundations, ASTM STP 444, 177–222.

Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7, 355–358.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed.: понижающие коэффициенты p-y для свайных кустов и несущая способность кустов буронабивных свай в несвязных грунтах.

Washington State Department of Transportation (2010). Bridge Design Memorandum No. 07-2010, Bearing resistance of shaft groups.

Brown, D.A., Morrison, C. and Reese, L.C. (1988). Lateral load behavior of pile group in sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114(11), 1261–1276.

McVay, M., Casper, R. and Shang, T.-I. (1995). Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(5), 436–441.

Rollins, K.M., Olsen, R.J., Egbert, J.J., Jensen, D.H., Olsen, K.G. and Garrett, B.H. (2006). Pile spacing effects on lateral pile group behavior: analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(10), 1272–1283.

Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1204, 577–594.

Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. Proceedings of the 6th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 2080, 473–485.

American Petroleum Institute (2000). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design, API RP 2A-WSD, 21st ed.

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

От теории к практике

Пошагово рассчитать в GeoTerva пример куста свай из этой презентации: числа совпадают.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне

Для пробных модулей регистрация не требуется.