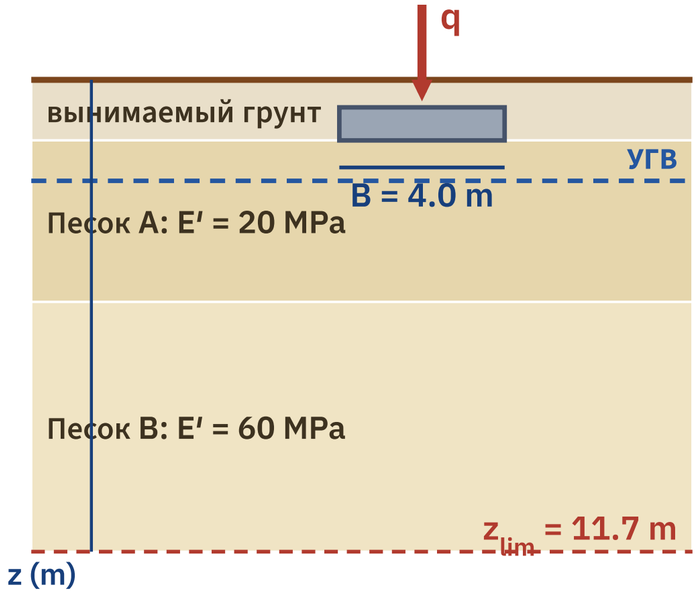
Презентация лекции по геотехнике · Осадки оснований

Упругая осадка: несвязный грунт

Лекция: от теории упругости к коэффициентам Steinbrenner, от слоистого профиля к гибкому и жёсткому фундаменту; песчаные и гравийные слои ведут себя как дренированные (E′, ν′); по каждой теме — пример расчёта.

- Закон Гука
- Коэффициенты Steinbrenner
- Слоистый разрез
- Давление нетто
- Гибкий и жёсткий фундамент
- Примеры расчёта



Что мы изучим на этой лекции?

От **закона Hooke** к интегралу осадки: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$ и $S = \int \varepsilon_z \, dz$

Вычисление **коэффициентов Steinbrenner** (F_1, F_2, I_s) и определение осадки прямоугольного фундамента в **центре** и в **углу**

Рассматривать несвязные слои как **дренированные**: $E'/p_a = \alpha \, N_{60}$, $\nu' \approx 0.25–0.35$

Суммировать **слоистый профиль** по разности $I_s(z_{lower}) - I_s(z_{upper})$

Определение **давления нетто** (влияние выемки) и **расчётной глубины** (глубины влияния)

Различение осадок **гибкого** и **жёсткого** фундамента (жёсткий ≈ 0.93 × центр гибкого)

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

Пример: гибкий прямоугольный фундамент 4 m × 6 m, q = 180 kPa, глубина котлована 1.5 m, УГВ 2.5 m; слой песка. Осадки приведены в mm.

Что рассчитывает этот модуль?

ТЕОРИЯ

Этот модуль рассматривает **только несвязные** (песок, гравий) слои и рассчитывает **упругую осадку**: так как песок сразу отдаёт воду, вся его осадка является упругой.

По напряжениям **Boussinesq** в нагруженном грунте **по закону Hooke** находится деформация, а интеграл деформации — это осадка.

Мгновенная осадка глинистых слоёв рассматривается в модуле «Упругая осадка: связный грунт», консолидация — в модуле «Консолидация», а сумма всех составляющих — в модуле «Полная осадка».

Решение **аналитическое**: замкнутые коэффициенты влияния и послойное суммирование; конечных элементов нет.

За рамками: метод Schmertmann, графики SPT/CPT, модуль, возрастающий с глубиной (Mayne–Poulos), жёсткость фундамента и взаимодействие «грунт — сооружение».

ТИП СЛОЯ

	Несвязный
Поведение	дренированный
E	E' (напр., αN_{60})
ν	0.25 – 0.35

Закон Hooke и интеграл осадки

ТЕОРИЯ

Под **абсолютно гибким** фундаментом, передающим давление нетто q_{net}, грунт представляет собой полубесконечную однородную упругую среду (напряжения по Boussinesq). Закон Гука даёт вертикальную деформацию, а её интеграл — осадку:

$$S = \int \varepsilon_z \, dz = \int \frac{\Delta\sigma_z - \nu\,(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E}\, dz$$

Боковые напряжения зависят от ν; поэтому деформация и осадка изменяются **как с E, так и с ν**.

По мере роста ν боковые напряжения **уменьшают** вертикальную деформацию: при том же E грунт с ν = 0.5 даёт меньшую осадку, чем грунт с ν = 0.3.

Осадка **обратно пропорциональна** E: увеличение модуля вдвое уменьшает осадку вдвое.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

q_{net}: давление нетто (прикладываемое после откопки)

$\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$: приращения напряжений

E, ν: упругие постоянные слоя

ε_z: вертикальная деформация (сжатие +)

Условие

ПРИМЕР

Дано

Приращение напряжений	$\Delta\sigma_z = 100$ kPa, $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = 40$ kPa
Грунт	$E' = 20$ MPa, $\nu' = 0.30$
Отсек	**толщина 1.0 m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить вертикальную деформацию и сжатие слоя; сравнить с допущением ν = 0 (одномерная задача).

Решение

РЕШЕНИЕ

1 Вертикальная деформация

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E} = \frac{100 - 0.30(40 + 40)}{20{,}000} = \frac{76.0}{20{,}000} = \mathbf{0.00380}$$

2 Сжатие слоя (H = 1.0 m)

$$\Delta S = \varepsilon_z H = 0.00380(1.0) = \mathbf{3.80}\ \text{mm}$$

3 Сравнение: ν = 0

$$\varepsilon_z = \frac{100}{20{,}000} = 0.00500 \Rightarrow \Delta S = 5.00\ \text{mm}$$

Боковые напряжения (ν = 0.30) уменьшают деформацию на **24%**: 3.80 mm против 5.00 mm в одномерном случае.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Решение в замкнутой форме для угла

ТЕОРИЯ

Для **угловой точки** равномерно нагруженного прямоугольника интеграл имеет решение в замкнутой форме (Steinbrenner):

$$S = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,I_s \qquad I_s = F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu}\,F_2$$

$$F_1 = \frac{A_0 + A_1}{\pi} \qquad F_2 = \frac{n'}{2\pi}\tan^{-1} A_2$$

m′ = L′/B′ и n′ = z/B′ (B′ — короткая сторона углового прямоугольника). **Центр** — угол четырёх прямоугольников (B/2 × L/2): α = 4, B′ = B/2. **Угол** — это угол всего прямоугольника: α = 1, B′ = B. Любая другая точка — алгебраическая сумма четырёх прямоугольников, имеющих угол в этой точке.

> При ν = 0.5 (1 − 2ν) = 0: **$I_s = F_1$** и (1 − ν²) = 0.75.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

α: число угловых прямоугольников (для центра 4, для угла 1)

B′: короткая сторона углового прямоугольника

m′ = L′/B′, n′ = z/B′

z: глубина от уровня подошвы фундамента

I_s: коэффициент формы

A_0, A_1, A_2 и граница полосы

ТЕОРИЯ

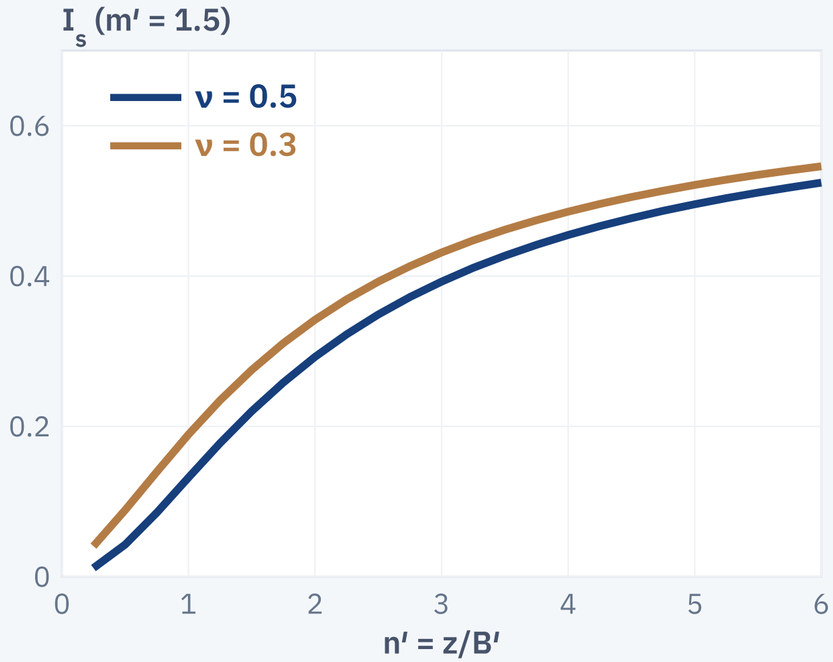
$$A_0 = m' \ln \frac{\left(1 + \sqrt{m'^2 + 1}\right)\sqrt{m'^2 + n'^2}}{m'\left(1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}\right)}$$

$$A_1 = \ln \frac{\left(m' + \sqrt{m'^2 + 1}\right)\sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \qquad A_2 = \frac{m'}{n'\sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

Полоса ($m' \to \infty$): $F_1 = \ln(1 + n'^2)/2\pi$ и $F_2 = (n'/2\pi)\tan^{-1}(1/n')$; на её краю $\alpha = 2$, $B' = B$.

Расчётное ядро вычисляет формулы напрямую; графики и таблицы с округлёнными значениями не требуются.

I_s растёт с глубиной и **медленно приближается к пределу**: вклад глубоких слоёв ограничен (сбоку $m' = 1.5$).



Условие

ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**B × L = 4 × 6 m, под центром на глубине z′ = 4 m (от уровня заложения фундамента)**
Угловой прямоугольник	**B/2 × L/2 = 2 × 3 m ⇒ B′ = 2 m, m′ = 1.5, n′ = z′/B′ = 2.0**
Грунт	$\nu' = 0.30$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Найти значения **A_0, A_1, A_2, F_1, F_2** и **I_s**.

Решение

РЕШЕНИЕ

1 A_0, A_1, A_2 (квадратные корни: $\sqrt{(m'^2+1)} = 1.8028$; $\sqrt{(m'^2+n'^2)} = 2.5000$; $\sqrt{(m'^2+n'^2+1)} = 2.6926$)

$$A_0 = 1.5 \ln \frac{(1+1.8028)(2.5000)}{1.5(1+2.6926)} = \mathbf{0.3527} \qquad A_1 = \ln \frac{(1.5+1.8028)\sqrt{5}}{1.5+2.6926} = \mathbf{0.5662}$$

$$A_2 = \frac{1.5}{2(2.6926)} = \mathbf{0.2785}$$

2 F_1, F_2 и I_s

$$F_1 = \frac{0.3527+0.5662}{\pi} = \mathbf{0.2925} \qquad F_2 = \frac{2}{2\pi}\tan^{-1}(0.2785) = \mathbf{0.0865}$$

$$I_s = F_1 + \frac{1-2(0.30)}{1-0.30}F_2 = \mathbf{0.3419}$$

$I_s = F_1 + 0.5714\,F_2 =$ **0.3419**; при $\nu' = 0.5$ осталось бы $F_1 = 0.2925$ (на 14% меньше).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Дренированный модуль деформации E′ и ν′

ТЕОРИЯ

Поскольку песок сразу отдаёт воду, он ведёт себя как дренированный; его осадка целиком упругая. В источнике (Das) модуль песка определяется по SPT как **$E'/p_a = \alpha N_{60}$** ($p_a \approx 100$ kPa):

$$\frac{E'}{p_a} = \alpha\, N_{60} \qquad \alpha = 5 \text{ (мелкозернистый песок)}\ \ 10 \text{ (чистый NC)}\ \ 15 \text{ (чистый OC)}$$

Модуль песка с глубиной **возрастает**: толстый слой следует разделить на несколько слоёв с возрастающим E′.

ν′ обычно 0.25–0.35; должно выполняться ν′ < 0.5 (для слоя несвязного грунта значение ν′ ≥ 0.5 задать нельзя).

Упругая осадка также зависит от ν′: с ростом ν′ она уменьшается.

α ДЛЯ ПЕСКА

α	E′ (N_{60} = 20)
5	10 MPa
10	20 MPa
15	30 MPa

Условие

ПРИМЕР

Дано

Песок	$N_{60} = 20$, $p_a = 100$ kPa; $\alpha = 5,\ 10,\ 15$
Коэффициент Пуассона	$\nu' = 0.25;\ 0.30;\ 0.35$ **(E′ = 20 MPa)**
Эталон	**Осадка однослойного основания при α = 10, ν′ = 0.30: S = 29.0 mm (пример 6)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Для каждого α — **E′**; осадка при ν′ = 0.25, 0.30, 0.35 и 0.5.

Решение

РЕШЕНИЕ

1 $E' = \alpha\, N_{60}\, p_a$ (N_{60} = 20; p_a = 100 kPa)

$$E' = \alpha\, N_{60}\, p_a: \quad 5(20)(0.1) = \mathbf{10}\ \text{MPa},\ \ 10(20)(0.1) = \mathbf{20},\ \ 15(20)(0.1) = \mathbf{30}\ \text{MPa}$$

ν′	0.25	0.30	0.35	0.50
S (mm)	30.1	29.0	27.7	22.8
$S / S_{\nu'=0.30}$	1.038	1.000	0.955	0.786

При изменении E′ с 10 до 30 MPa осадка уменьшается с 58 до 19 mm (обратная пропорциональность). Изменение ν′ с 0.25 до 0.35 меняет осадку лишь на 8%; при ν′ = 0.5 она была бы на 21% меньше.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Сначала выемка снимает нагрузку

ТЕОРИЯ

Выемка снимает **эффективное бытовое напряжение** на уровне дна (УГВ не меняется). Когда один модуль используется и для разгрузки, и для повторного нагружения, упругое поднятие дна котлована восстанавливается при повторном нагружении; мгновенную осадку определяет **давление нетто**:

$$q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$$

$\sigma'_{v0}(D_{exc})$: начальное эффективное напряжение на дне котлована (выше УГВ — γ, ниже — $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$).

Если $q_{net} \leq 0$, осадка не возникает (отрицательное значение соответствует упругому поднятию).

Если котлована нет, $q_{net} = q_{gross}$ (давление приложено на поверхности грунта).

NEDEN NET?

Нагрузка, равная весу грунта, удалённого при разработке котлована, **возвращается** при устройстве фундамента. Осадка грунта вызывается только давлением, **добавляемым сверх** этой нагрузки.

Условие

ПРИМЕР

Дано

Нагрузка	$q_{gross} = 180$ kPa; **глубина котлована** $D_{exc} = 1.5$ m
Грунт	$\gamma = 18.5$ kN/m^3, $\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m^3
УГВ	**(a) 2.5 m (ниже дна котлована) · (b) 1.0 m (выше дна котлована)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

В каждом случае найти значения $\sigma'_{v0}(D_{exc})$ и q_{net}.

Решение

РЕШЕНИЕ

1 (a) УГВ 2.5 m > 1.5 m: на дне котлована воды нет

$$\sigma'_{v0} = \gamma D_{exc} = 18.5(1.5) = 27.75 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; q_{net} = 180 - 27.75 = \mathbf{152.25} \text{ kPa}$$

2 (b) УГВ 1.0 m: дно котлована на 0.5 m ниже уровня воды (γ′ = 19.5 − 9.81 = 9.69 kN/m³)

$$\sigma'_{v0} = 18.5(1.0) + 9.69(0.5) = 23.345 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; q_{net} = 180 - 23.345 = \mathbf{156.66} \text{ kPa}$$

Если вода выше дна котлована, снимаемое эффективное напряжение уменьшается, и давление нетто **возрастает** (152.2 → 156.7 kPa): высокий УГВ увеличивает мгновенную осадку.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Глубина влияния: Δσ = p · q

ТЕОРИЯ

Приращение напряжений под нагрузкой убывает с глубиной, но не обращается в нуль; для суммирования необходима нижняя граница: **расчётная глубина z_{lim}**. Модуль предлагает два правила:

Глубина влияния: глубина под центром, на которой прирост напряжений по Boussinesq снижается до **p** от приложенного давления (обычно p = 10%): I(z′) = p и $z_{lim} = D_f + z'$.

Нижняя граница профиля: расчёт заканчивается в последнем слое (жёсткое основание, например скальный грунт или плотный гравий; слой на жёстком основании по Steinbrenner).

Если профиль заканчивается выше z_{lim}, последний слой продолжается до z_{lim} с теми же свойствами.

$$I = \frac{\Delta\sigma_z}{q} = 4\, I_{corner}(m, n) \qquad m = \frac{B}{2z'},\ n = \frac{L}{2z'}$$

z′/B (p = %10 | %20)

L/B	p = %10	p = %20
1.0	2.09 B	1.40 B
1.5	2.55 B	1.70 B
2.0	2.92 B	1.94 B
5.0	4.33 B	2.68 B
ленточный	6.34 B	3.13 B

Условие

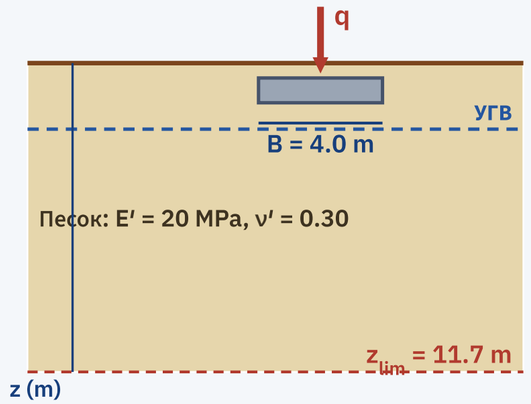
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**B × L = 4 × 6 m (L/B = 1.5), на уровне дна котлована; D_f = 1.5 m**
Правило	**глубина влияния, p = 10% (I = 0.10)**
Формула	$I = 4\,I_{corner}(m, n),\ m = B/2z',\ n = L/2z'$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

z′ и **z_{lim}**; значение I при z′ = 4 m и 10.19 m.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 z′ = 4 m: m = 2/4 = 0.5; n = 3/4 = 0.75

$$I = 4\,I_{corner}(0.5;\,0.75) = 4(0.1071) = \mathbf{0.4283}$$

2 Условие I = 0.10: методом половинного деления

$$z' = \mathbf{10.19}\ \text{m} \quad (= 2.55\,B)$$

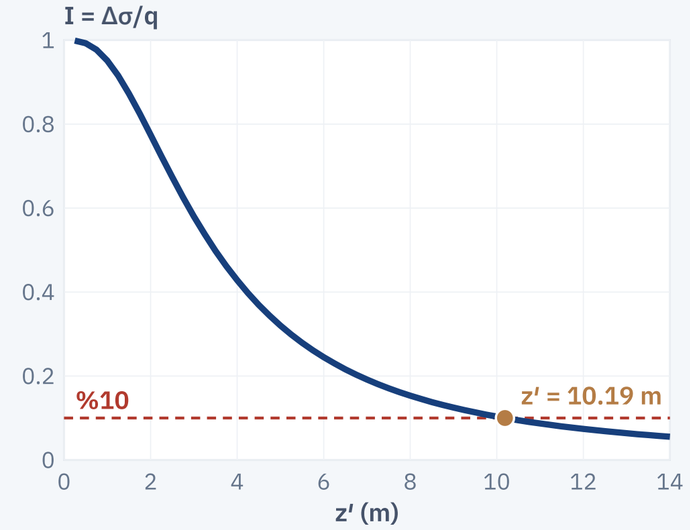
$$z_{lim} = D_f + z' = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}\ \text{m}$$

3 Проверка: z′ = 10.19 m ⇒ m = 2/z′, n = 3/z′

$$m = 0.1963,\ n = 0.2945$$

$$I = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$

Суммирование ведётся до глубины 10.19 m (2.55 B); глубже находится зона, где давление составляет менее 10%. Для квадратного фундамента — 2.09 B, для ленточного — 6.34 B: **более широкий фундамент воздействует глубже**.



Проверить решение в GeoTerva ↗

Вклад слоя: разность I_s

ТЕОРИЯ

Слой между z_{top} и z_{bottom} (от уровня подошвы фундамента) вносит **разность решения для полубесконечной среды между двумя глубинами**, с собственными E и ν:

$$\Delta S = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,\left[I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{üst})\right]$$

Это интеграл деформации по закону Hooke по слою (при напряжениях однородного полупространства): при этом допущении он **точен**; результат не зависит от толщины слоя Δz (слои служат лишь для таблиц и цветовых полей).

Заменяет **средневзвешенный модуль деформации** в формуле для однослойного основания.

Слой, жёсткость которого увеличивается с глубиной, следует разбить на несколько слоёв.

ИТОГО

Осадка профиля есть **сумма** вкладов слоёв до z_{lim}: $S = \Sigma\,\Delta S_i$. Для каждого слоя учитывается только часть между уровнем фундамента и z_{lim}.

Условие

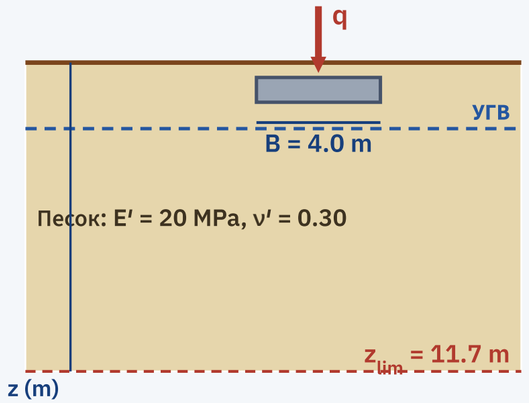
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**прямоугольный, B × L = 4 × 6 m, глубина заложения D_f = 1.5 m (дно котлована)**
Нагрузка	$q_{gross} = 180$ kPa **(гибкий фундамент, равномерное давление)**
Грунт	**однослойный песок:** $E' = 20$ MPa, $\nu' = 0.30$, $\gamma = 18.5$ kN/m^3; **УГВ 2.5 m**
Расчётная глубина	**глубина влияния, p = 10% (Пример 5): z′ = 10.19 m, z_{lim} = 11.69 m; слой продолжается до этой глубины**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Осадка **S** гибкого фундамента **в центре**.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Давление нетто (пример 4a) и коэффициент k = $q_{net}(1 - \nu^2)/E$

$$q_{net} = 152.25 \text{ kPa} \qquad k = \frac{q_{net}(1-\nu^2)}{E} = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927 \text{ (безразмерная величина)}$$

2 Центр: α = 4, B′ = B/2 = 2 m, m′ = 1.5; z′ = 10.19 m ⇒ n′ = z′/B′ = 5.094

$$A_0 = 0.6569,\ A_1 = 0.9097,\ A_2 = 0.0545$$

$$F_1 = 0.4986,\ F_2 = 0.0441 \ \Rightarrow\ I_s = \mathbf{0.5239}$$

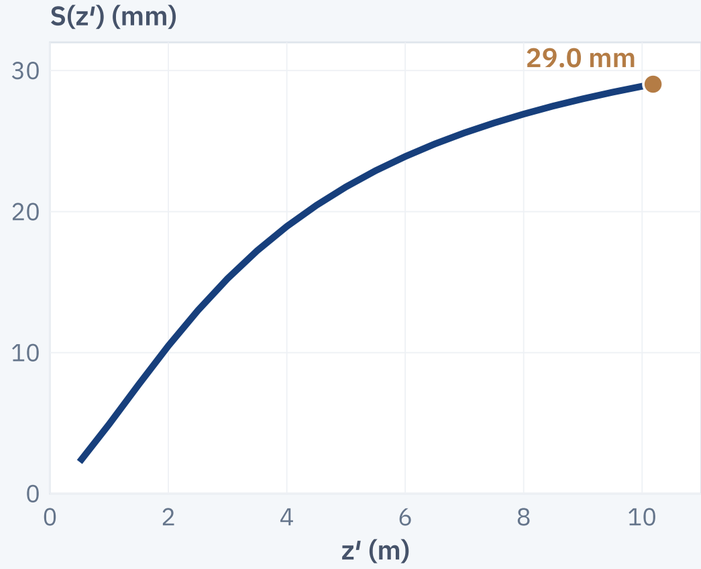
Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Осадка: $S = k \cdot \alpha\, B' \cdot I_s$

$$S = 0.006927\,(4)(2)(0.5239) = 0.006927(4.1909)$$
$$= 0.02903 \text{ m} = \mathbf{29.0\ mm}$$

Осадка в центре **29.0 mm**. На графике S(z′): основная часть осадки образуется в верхних 2B (8 m); вклад глубоких слоёв мал.



Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

ПРИМЕР

Дано

Фундамент, нагрузка	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, D_f = 1.5 m ⇒ q_{net} = 152.25 kPa**
Слой A	**толщина 4 m от уровня подошвы фундамента:** $E' = 20$ MPa
Слой B	**ниже, до z_{lim}:** $E' = 60$ MPa
Расчётная глубина	**z'_{lim} = 10.19 m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Найти осадку **в центре** каждого слоя и суммарную осадку; сравнить с расчётом для одного слоя.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Коэффициенты слоя $k = q_{net}(1 - \nu^2)/E$ и $\alpha\, B'\, I_s$ (центр; Примеры 2 и 6)

$$k_A = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927 \qquad k_B = \frac{152.25(0.91)}{60{,}000} = 0.002309$$

$$8\, I_s(z' = 4) = 8(0.3419) = 2.7351 \qquad 8\, I_s(z'_{lim}) = 4.1909$$

При разделении профиля на два слоя каждый слой суммируется **со своим модулем деформации** через приращение I_s на своём интервале.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

2 Осадки слоёв и суммарная осадка

$$\Delta S_A = k_A (8I_s)_4 = 0.006927(2.7351) = 18.9 \text{ mm}$$

$$\Delta S_B = k_B \left[(8I_s)_{lim} - (8I_s)_4\right] = 0.002309(4.1909 - 2.7351) = 3.4 \text{ mm}$$

$$S = \Delta S_A + \Delta S_B = \mathbf{22.3\ mm}$$

Полная осадка в центре составляет **22.3 mm** (расчётное ядро: 22.3 mm). Для однослойной модели (E = 20 MPa) получалось 29.0 mm: так как нижний слой **более жёсткий**, осадка уменьшилась на **23%**; на слой A приходится 85% от общей осадки.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Центр, угол и осадка жёсткого фундамента

ТЕОРИЯ

Формулы дают осадку **абсолютно гибкого** фундамента: **максимальную в центре**, минимальную в углу; их разность — **разность осадок** гибкого фундамента. Жёсткий фундамент оседает **равномерно**: примерно 0.93 от осадки центра гибкого фундамента:

$$S_{rigid} \approx 0.93\, S_{center} \qquad S_{diff} = S_{center} - S_{köşe}$$

Центр: α = 4, B′ = B/2. Угол: α = 1, B′ = B (угол всего прямоугольника).

Заглубление: коэффициент глубины Fox I_f (зависящий от D_f/B, B/L и ν) уменьшает осадку заглублённого фундамента. Модуль принимает I_f = 1: поправки нет, **в запас надёжности**.

ПРИМЕЧАНИЕ

Реальный фундамент занимает промежуточное положение между гибким и жёстким. Модуль выдаёт два крайних значения; промежуточная жёсткость и взаимодействие «грунт — сооружение» выходят за рамки модуля.

Условие

ПРИМЕР

Дано

Профиль	**Пример 7: слой A (4 m) и слой B; z'_{lim} = 10.19 m**
Фундамент	**гибкий, 4 × 6 m**
Угол	**α = 1, B′ = B = 4 m ⇒ m′ = L/B = 1.5; n′ = z′/4**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Осадка **угловой точки**, осадка **жёсткого** фундамента и **неравномерная** осадка гибкого фундамента.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Значения $4 \cdot I_s$ для угла ($n' = z'/4$)

$$z' = 4\ (n' = 1):\ 4\,I_s = 0.7565$$

$$z'_{lim} = 10.19\ (n' = 2.547):\ 4\,I_s = 1.5865$$

2 Осадка угла

$$S_{köşe} = k_A(0.7565) + k_B(1.5865 - 0.7565) = 5.2 + 1.9 = \mathbf{7.2\ mm}$$

3 Жёсткий и дифференциальный

$$S_{rigid} = 0.93(22.3) = \mathbf{20.7\ mm} \qquad S_{diff} = 22.3 - 7.2 = \mathbf{15.2\ mm}$$

Центр 22.3, угол 7.2, жёсткий 20.7 mm; разность осадок гибкого фундамента **15.2 mm**. Угловая точка оседает лишь на 32% от осадки центра.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

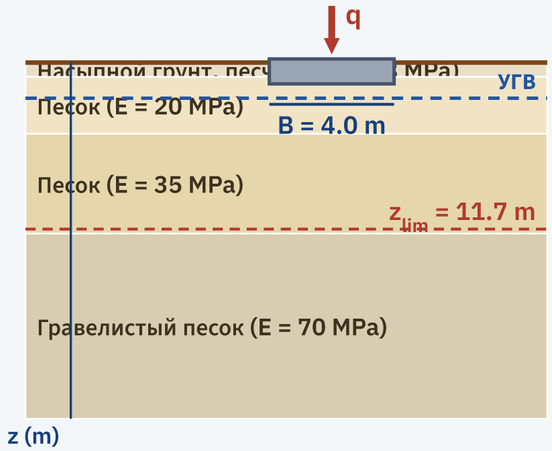
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, глубина котлована 1.5 m, УГВ 2.5 m**
Профиль	**Насыпной грунт, песчаный 0–1 m: E′ = 8 MPa; Песок 1–5 m: E′ = 20 MPa; Песок 5–12 m: E′ = 35 MPa; Гравелистый песок 12–25 m: E′ = 70 MPa**
Расчётная глубина	**глубина влияния, p = 10%**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Послойная осадка в **центре** и в **углу**; гибкий фундамент: центр, угол; жёсткий фундамент и неравномерная осадка.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Давление нетто (дно котлована 1.5 m)

$$\sigma'_{v0}(1.5) = 27.25 \text{ kPa} \quad \Rightarrow \quad q_{net} = 180 - 27.25 = \mathbf{152.75} \text{ kPa}$$

2 Расчётная глубина и слои

$$z_{lim} = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69} \text{ m}$$ слой над дном котлована удаляется

Дно котлована (1.5 m) находится внутри слоя «Песок»: учитывается только часть слоёв ниже 1.5 m. z_{lim} = 11.69 m остаётся внутри слоя «Песок», поэтому этот слой обрезается.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

Слой	z (m)	H (m)	E (MPa)	k (×10⁻³)	ΔS в центре (mm)	ΔS в углу (mm)
Песок (SM, рыхлый–средней плотности)	1.50 – 5.00	3.50	20	6.950	17.3	4.6
Песок (SM, средней плотности)	5.00 – 11.69	6.69	35	3.972	6.8	3.7
Итого					**24.1**	**8.3**

Центр **24.1 mm**, угол 8.3 mm, жёсткий фундамент 22.4 mm, неравномерная осадка 15.8 mm. Модуль даёт те же значения.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Что следует учитывать при интерпретации результатов

ТЕОРИЯ

Допущения:

- Уровень фундамента = дно котлована; равномерное давление на полностью гибкий фундамент.
- В каждом слое — напряжения **однородного полупространства** (с ν данного слоя).
- Каждый слой несвязный и даёт осадку в **дренированных** условиях (E′, ν′).
- Поправка на заглубление отсутствует; жёсткий фундамент ≈ 0.93 × значение в центре гибкого.
- Знак: осадка **положительна**; переключатель в заголовке переводит на обозначение, в котором осадка, направленная вверх, считается положительной.

Вне рамок модуля: глинистые слои; метод Schmertmann, номограммы SPT/CPT, модуль, возрастающий с глубиной, жёсткость фундамента и взаимодействие грунта и сооружения, метод конечных элементов.

ЦВЕТОВЫЕ ЗОНЫ

Виды в разрезе показывают приращение напряжений, модуль деформации, деформацию и осадку S(z) цветовыми полосами; значение в центре на уровне фундамента — это итоговая осадка.

Резюме

Главное

Hooke: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$; $\mathbf{S = \int \varepsilon_z\, dz}$; обратно пропорционально E

Steinbrenner: $S = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - \nu^2)/E \cdot I_s$; $I_s = F_1 + (1 - 2\nu)/(1 - \nu)\, F_2$; центр: $\alpha = 4$, $B' = B/2$; угол: $\alpha = 1$, $B' = B$

Песок: $E'/p_a = \alpha\, N_{60}$ ($\alpha = 5, 10, 15$), $\nu' \approx 0.25–0.35$; при увеличении ν' осадка уменьшается

Слоистое основание: $\Delta S = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - \nu^2)/E \cdot [I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{top})]$; не зависит от толщины слоя

Давление нетто $q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$; **расчётная глубина** $I(z') = p$ (2.09 B для квадрата, 2.55 B для L = 1.5 B, 6.34 B для полосы)

Гибкий: центр > угол (разность осадок); **жёсткий** ≈ 0.93 × центр; поправки на заглубление нет ($I_f = 1$)

Список литературы

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

Steinbrenner, W. (1934). Tafeln zur Setzungsberechnung. Die Strasse, 1, 121–124.

Fox, E.N. (1948). The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface. Proc. 2nd ICSMFE, Rotterdam, 1, 129–132.

Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design, 5th ed. McGraw-Hill.

Duncan, J.M. & Buchignani, A.L. (1976). An engineering manual for settlement studies. University of California, Berkeley.

Kulhawy, F.H. & Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. EPRI EL-6800.

ПРИМЕЧАНИЕ

Все числовые примеры получены с помощью собственного расчётного ядра модуля, модуль даёт те же значения.

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

От теории к практике

Рассчитать пример проекта из этой презентации в GeoTerva шаг за шагом: модуль открывается с этой моделью.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне
Для пробных модулей регистрация не требуется.