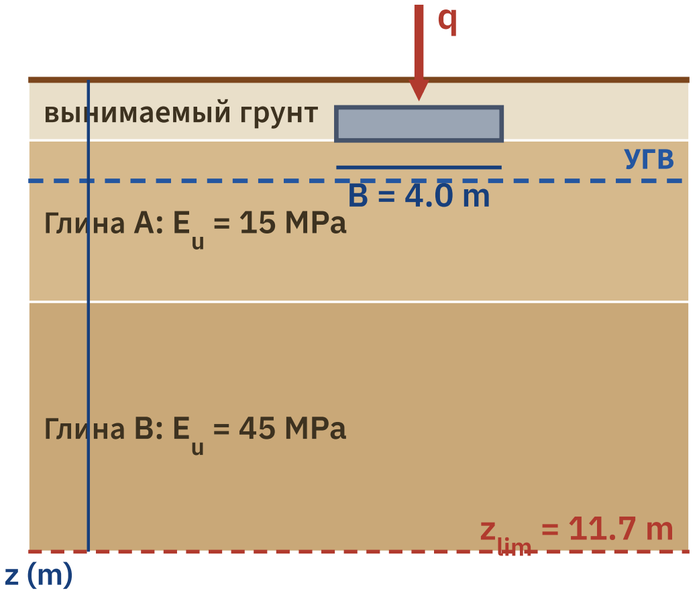
Презентация лекции по геотехнике · Осадки оснований

Упругая осадка: связный грунт

Лекция: от теории упругости к коэффициентам Steinbrenner, от слоистого профиля к гибкому и жёсткому фундаменту; глинистые слои работают в недренированном состоянии (E_u, $\nu = 0.5$); пример расчёта по каждой теме.

- 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**
- Рассмотрение связных слоёв как **недренированных** ($E_u = \beta \, c_u$, $\nu = 0.5$)
- 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 глины. Осадки приведены в mm.

Что рассчитывает этот модуль?

ТЕОРИЯ

Этот модуль рассматривает **только связные** (глина, пылеватый грунт) слои и вычисляет **мгновенную (упругую) осадку**: осадку, возникающую сразу после приложения нагрузки без изменения объёма.

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

Консолидация глины (осадка, возникающая при отжатии воды) рассматривается в модуле «Консолидация»; сумма обеих осадок — в модуле «Полная осадка (2D)».

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

	Связный
Поведение	недренированный
E	$E_u = \beta\, c_u$
ν	0.5

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	$E_u = 25$ MPa, $\nu = 0.5$
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

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E} = \frac{100 - 0.50(40 + 40)}{25{,}000} = \frac{60.0}{25{,}000} = \mathbf{0.00240}$$

2 Сжатие слоя (H = 1.0 m)

$$\Delta S = \varepsilon_z H = 0.00240(1.0) = \mathbf{2.40}\ \text{mm}$$

3 Сравнение: ν = 0

$$\varepsilon_z = \frac{100}{25{,}000} = 0.00400 \;\Rightarrow\; \Delta S = 4.00\ \text{mm}$$

Боковые напряжения (ν = 0.50) уменьшают деформацию на **40%**: 2.40 mm против 4.00 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

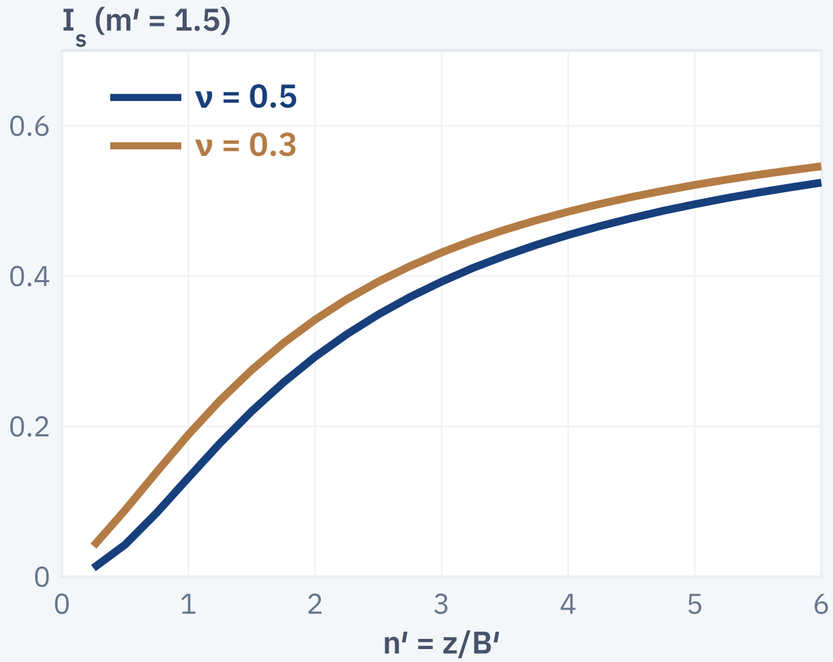
$$A_0 = m' \ln \frac{\left(1 + \sqrt{m'^2 + 1}\right)\sqrt{m'^2 + n'^2}}{m'\left(1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}\right)}$$

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

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	$\nu = 0.5$ **(недренированные условия)**

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: √(m′² + 1) = 1.8028; √(m′² + n′²) = 2.5000; √(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

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

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2(0.50)}{1 - 0.50} F_2 = \mathbf{0.2925}$$

Так как ν = 0.5, (1 − 2ν) = 0 и **I_s = F_1 = 0.2925**; F_2 на результат не влияет.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Недренированный модуль деформации E_u, ν = 0.5

ТЕОРИЯ

Насыщенная глина **не меняет объёма** при приложении нагрузки (ν = 0.5): это её мгновенная осадка. Осадка, возникающая по мере выхода воды, — это консолидация, и она рассчитывается в другом модуле. Недренированный модуль деформации определяется по сопротивлению сдвигу:

$$E_u = \beta\, c_u \qquad \nu = 0.5$$

β зависит от индекса пластичности и коэффициента переуплотнения: изменяется **от нескольких сотен до примерно 1500**.

При ν = 0.5 $I_s = F_1$ и $(1 - \nu^2) = 0.75$.

Глина, жёсткость которой увеличивается с глубиной, **разбивается на несколько слоёв**.

β для глины

β	E_u (c_u = 50 kPa)
300	15 MPa
500	25 MPa
1000	50 MPa
1500	75 MPa

Условие

ПРИМЕР

Дано

Глина	$c_u = 50$ kPa; $\beta = 300,\ 500,\ 1000,\ 1500$
Эталон	**Для β = 500 осадка при расчёте как одного слоя в многослойном примере S = 18.1 mm (Пример 6)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Для каждого β — **E_u** и отношение осадки к эталонному значению.

Решение

РЕШЕНИЕ

1 Недренированный модуль деформации (c_u = 50 kPa)

$$E_u = \beta c_u: \quad 300(50) = \mathbf{15}\ \text{MPa},\ \ 500(50) = \mathbf{25},\ \ 1000(50) = \mathbf{50},\ \ 1500(50) = \mathbf{75}\ \text{MPa}$$

β	E_u (MPa)	S (mm)	$S / S_{\beta=500}$
300	15	30.2	1.67
500	25	18.1	1.00
1000	50	9.1	0.50
1500	75	6.0	0.33

Осадка **обратно пропорциональна** E_u: при β от 300 до 1500 осадка изменяется в **5 раз** (30 → 6 mm). Модуль деформации глины — наименее определённая входная величина расчёта.

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	$\gamma = 19$ 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

$$\sigma'_{v0} = \gamma D_{exc} = 19.0(1.5) = 28.50 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; q_{net} = 180 - 28.50 = \mathbf{151.50} \text{ kPa}$$

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

$$\sigma'_{v0} = 19.0(1.0) + 9.69(0.5) = 23.845 \text{ kPa} \;\Rightarrow\; q_{net} = 180 - 23.845 = \mathbf{156.16} \text{ kPa}$$

Если вода выше дна котлована, снимаемое эффективное напряжение уменьшается, и давление нетто **возрастает** (151.5 → 156.2 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

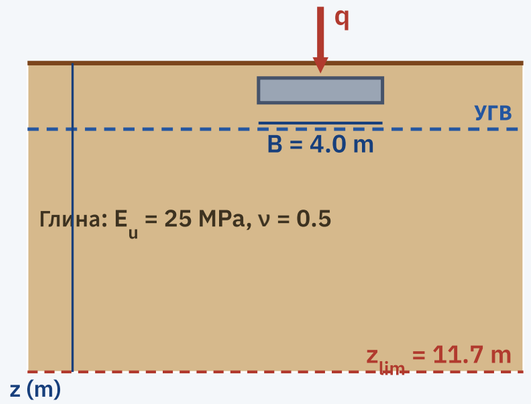
ПРИМЕР

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

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

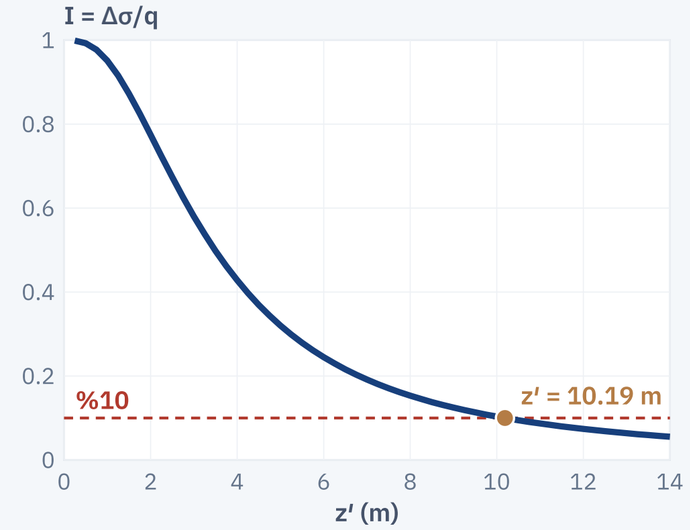
$$z_{lim} = D_f + z' = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}\ \text{m}$$

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

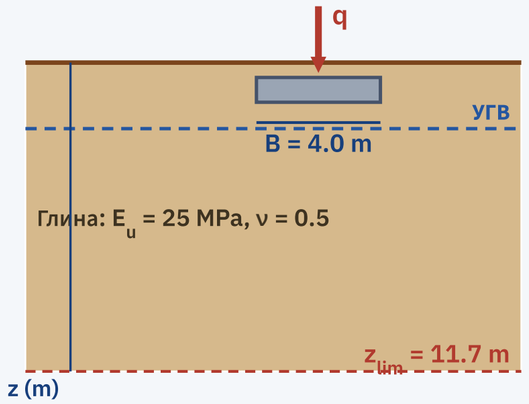
ПРИМЕР

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	**однослойная глина:** $E_u = 25$ MPa, $\nu = 0.5$, $\gamma = 19$ 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 = $q_{net}(1 - \nu^2)/E$

$$q_{net} = 151.50 \text{ kPa} \qquad k = \frac{q_{net}(1-\nu^2)}{E} = \frac{151.50(0.75)}{25{,}000} = 0.004545 \text{ (безразмерная величина)}$$

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

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

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

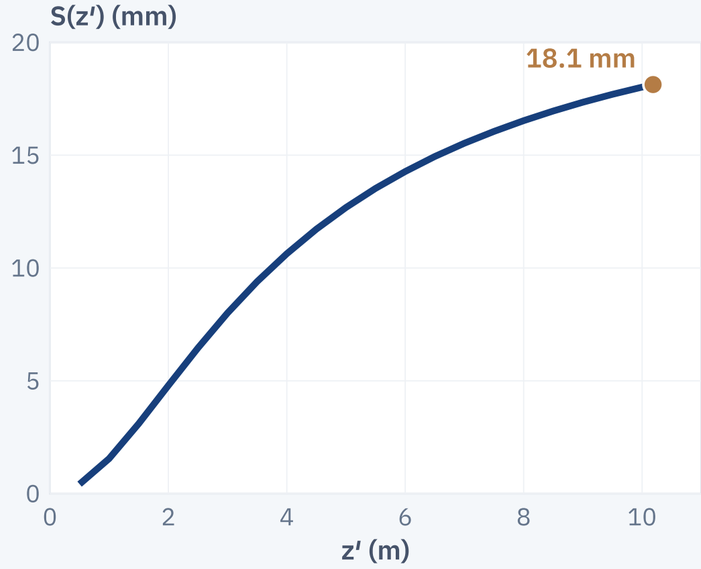
Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

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

$$S = 0.004545\,(4)(2)(0.4986) = 0.004545(3.9892)$$
$$= 0.01813\ \text{m} = \mathbf{18.1\ mm}$$

Осадка в центре **18.1 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} = 151.50 kPa**
Слой A	**толщина 4 m от уровня подошвы фундамента:** $E_u = 15$ MPa
Слой B	**ниже, до z_{lim}:** $E_u = 45$ 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)

$$k_A = \frac{151.50(0.75)}{15{,}000} = 0.007575 \qquad k_B = \frac{151.50(0.75)}{45{,}000} = 0.002525$$

$$8\, I_s(z' = 4) = 8(0.2925) = 2.3398 \qquad 8\, I_s(z'_{lim}) = 3.9892$$

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

$$\Delta S_A = k_A (8I_s)_4 = 0.007575(2.3398) = 17.7 \text{ mm}$$

$$\Delta S_B = k_B \left[(8I_s)_{lim} - (8I_s)_4\right] = 0.002525(3.9892 - 2.3398) = 4.2 \text{ mm}$$

$$S = \Delta S_A + \Delta S_B = \mathbf{21.9\ mm}$$

Полная осадка в центре составляет **21.9 mm** (расчётное ядро: 21.9 mm). Для однослойной модели (E = 25 MPa) получалось 18.1 mm: так как верхние 4 m **мягкие**, осадка увеличилась на **21%**; на слой A приходится 81% 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 ($n' = z'/4$)

$$z' = 4\ (n' = 1):\ 4\,I_s = 0.5277$$

$$z'_{lim} = 10.19\ (n' = 2.547):\ 4\,I_s = 1.4137$$

2 Осадка угла

$$S_{köşe} = k_A(0.5277) + k_B(1.4137 - 0.5277) = 4.0 + 2.2 = \mathbf{6.2\ mm}$$

3 Жёсткий и дифференциальный

$$S_{rigid} = 0.93(21.9) = \mathbf{20.4\ mm} \qquad S_{diff} = 21.9 - 6.2 = \mathbf{15.7\ mm}$$

Центр 21.9, угол 6.2, жёсткий 20.4 mm; разность осадок гибкого фундамента **15.7 mm**. Угловая точка оседает лишь на 28% от осадки центра.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

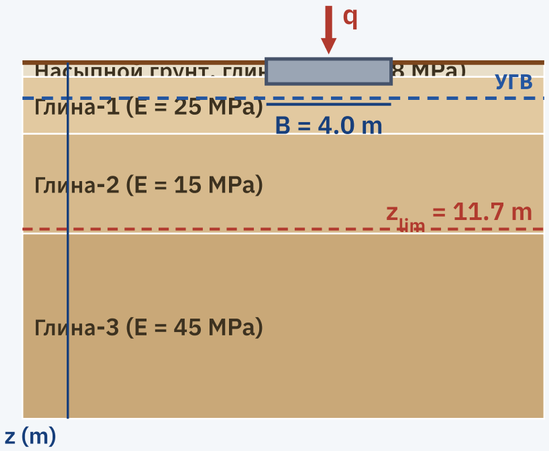
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, глубина котлована 1.5 m, УГВ 2.5 m**
Профиль	**Насыпной грунт, глинистый, 0–1 m: E_u = 8 MPa; Глина-1, 1–5 m: E_u = 25 MPa; Глина-2, 5–12 m: E_u = 15 MPa; Глина-3, 12–25 m: E_u = 45 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)

$$\sigma'_{v0}(1.5) = 27.50 \text{ kPa} \quad \Rightarrow \quad q_{net} = 180 - 27.50 = \mathbf{152.50} \text{ kPa}$$

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 Глина-1: учитывается только часть слоёв ниже 1.5 m. Так как z_{lim} = 11.69 m попадает внутрь слоя Глина-2, этот слой усекается.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

Слой	z (m)	H (m)	E (MPa)	k (×10⁻³)	ΔS в центре (mm)	ΔS в углу (mm)
Глина-1 (CL, тугопластичная)	1.50 – 5.00	3.50	25	4.575	9.5	2.0
Глина-2 (CH, твёрдая)	5.00 – 11.69	6.69	15	7.625	14.7	7.5
Итого					**24.1**	**9.5**

Центр **24.1 mm**, угол 9.5 mm, жёсткий фундамент 22.4 mm, неравномерная осадка 14.7 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 связный и оседает в **недренированных** условиях (E_u, ν = 0.5).
- 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 области применения: консолидация и вторичная компрессия глины; несвязные слои; Schmertmann, номограммы SPT/CPT, модуль, возрастающий с глубиной, жёсткость фундамента и взаимодействие грунта и сооружения, конечные элементы.

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: $\alpha = 1$, $B' = B$

Глина: $E_u = \beta\, c_u$ (β — от нескольких сотен до 1500), $\nu = 0.5 \Rightarrow I_s = F_1$

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.