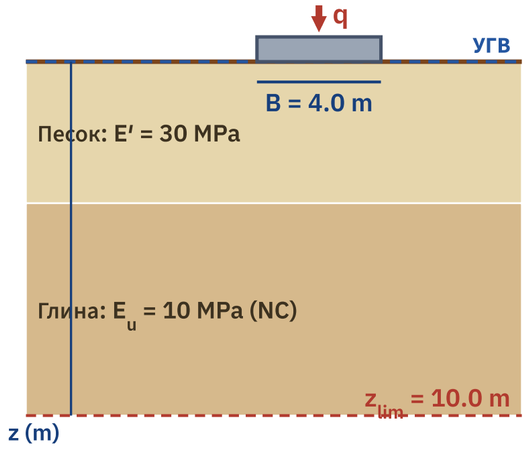
Презентация лекции по геотехнике · Осадки оснований

Полная осадка: слои глины и песка

Лекция: сложение мгновенной (упругой) осадки и консолидации глины в разрезе из глинистых и песчаных слоёв, осадка в центре, в углу и для жёсткого фундамента, полная осадка во времени; по каждой теме — пример расчёта.

- $S = S_e + S_c$
- Слои глины и песка
- Steinbrenner
- Траектория напряжений
- Центр · угол · жёсткий
- Кривая осадка–время



Что мы изучим на этой лекции?

- Разделение осадки по типу слоя: **связный** слой = мгновенная осадка + консолидация, **несвязный** слой = только упругая осадка
- Объединять в одних и тех же слоях расчёты по **Steinbrenner** (мгновенная осадка) и по **траектории напряжений** (консолидация)
- Понимание влияния котлована: **давление нетто** определяет мгновенную осадку, а **подъём дна и повторное сжатие** — консолидацию
- Определение по полной осадке осадки **центра** и **угла** гибкого фундамента, осадки жёсткого фундамента и разности осадок
- Построение кривой осадка–время $\mathbf{S(t) = S_e + \Sigma\, U_i(t)\, S_{c,i}}$
- Проверить, что результат модуля равен сумме результатов модулей одного типа («Упругая осадка» + «Консолидация»)

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 разреза: 6 m нормально уплотнённой глины над 4 m песка; фундамент 4 × 6 m, q = 150 kPa. Осадки приведены в mm.

Полная осадка = мгновенная осадка + консолидация

ТЕОРИЯ

$S = S_e + S_c$ связный слой: S_e(недренированный) + S_c слой несвязного грунта: S_e(др

Обе составляющие вычисляются **в одних и тех же слоях**, при одном и том же приращении напряжений по Boussinesq, одном и том же котловане и одной и той же расчётной глубине. Решение **аналитическое**: замкнутые коэффициенты влияния, путь напряжений по слоям и теория Terzaghi; конечные элементы не используются.

Насыщенная глина при приложении нагрузки не меняет объёма (ν = 0.5): это её мгновенная осадка. Вода отжимается медленно, и глина сжимается по пути напряжений: это консолидация. Поскольку песок отдаёт воду сразу, вся его осадка является упругой.

При профиле одного типа модуль даёт **тот же результат**, что и модуль «Упругая осадка» или «Консолидация» (Пример 6).

Тип каждого слоя выбирается в таблице «Инженерно-геологический разрез» и определяет, какие параметры потребуются для этого слоя.

ТИП СЛОЯ

Слой	Мгновенная осадка	Консолидация
Связный	недренированный E_u, ν = 0.5	имеются: C_c, C_r, C_s, e_0, σ'_p (или m_v), C_v
Несвязный	дренированные E', ν'	нет

Закон Гука и коэффициенты Steinbrenner

ТЕОРИЯ

Осадка под абсолютно гибким фундаментом, передающим нетто-давление q_{net}, равна интегралу вертикальных деформаций (напряжения Boussinesq, однородное полупространство):

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

Решение в замкнутом виде для угла прямоугольника (Steinbrenner):

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

m′ = L′/B′, n′ = z/B′. **Центр**: α = 4, B′ = B/2; **угол**: α = 1, B′ = B.

Поскольку в связном слое ν = 0.5, $I_s = F_1$ и (1 − ν²) = 0.75.

МОДУЛИ ДЛЯ РАСЧЁТА УПРУГОЙ ОСАДКИ

Формулы для F_1, F_2, A_0, A_1, A_2 и подробные примеры приведены в презентациях по упругой осадке; здесь используются только их результаты для суммирования.

Слоистый профиль и давление нетто

ТЕОРИЯ

Слой, расположенный между глубинами z_{top} и z_{bottom} от уровня заложения фундамента, вносит разность I_s со своими E и ν:

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

Выемка снимает эффективное бытовое напряжение на уровне подошвы; в упругом грунте с одним модулем деформации разгрузка восполняется при повторном нагружении, и мгновенную осадку определяет **давление нетто**:

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

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

Результат не зависит от толщины слоёв; слои нужны лишь для таблиц и цветовых зон.

NEDEN FARKLI?

Мгновенная осадка рассчитывается по **давлению нетто**, а консолидация — по **приращению эффективного напряжения** вдоль пути напряжений; разработка котлована влияет на них по-разному.

Путь напряжений и сжатие слоя

ТЕОРИЯ

В связных слоях консолидация рассчитывается не за один шаг от начального до конечного напряжения, а **вдоль пути напряжений**: набухание при разработке котлована (C_s), при повторном нагружении — сначала возврат поднятия, повторное сжатие с C_r до σ'_p, а за этим пределом — первичное (виргинное) сжатие с C_c:

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final} \qquad \sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$$

$$S_c = \sum \left(S_b + S_r + S_v\right), \quad f = \frac{\Delta H}{1 + e_0} \qquad \Delta\sigma_{load} = q\, I_z(z') \qquad \sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

В нормально уплотнённой (NC) глине (OCR = 1): $S = C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$ (без котлована).

Подъём дна отрицателен; $S_{net} = S_c + S_{heave}$. При варианте **«сохраняется»** осадка отсчитывается от исходного грунта, при варианте **«обнуляется»** — от поднявшегося дна.

Расчётная глубина: $I_z(z')$ = p (обычно 10%) либо подошва профиля; метод m_v — линейный вариант.

ДЕТАЛИ

Полное изложение пути напряжений, режимов, выемки и кривой времени дано в презентации «Консолидация».

Условие

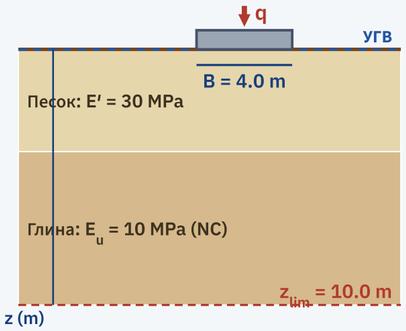
ПРИМЕР

Дано

Профиль	**песок 0–4 m:** $E' = 30$ MPa, $\nu' = 0.30$, $\gamma_{sat} = 19$ · **глина 4–10 m (NC):** $E_u = 10$ MPa, $\nu = 0.5$, $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_v = 2$ m²/год, $\gamma_{sat} = 18$
Фундамент	**Гибкий прямоугольник 4 × 6 m, $q = 150$ kPa, на поверхности грунта; УГВ на поверхности; расчётная глубина 10 m (подошва профиля)**
Котлован	**нет (q_{net} = 150 kPa)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Мгновенная осадка S_e каждого слоя в **центре** и в **углу**.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Песок (0–4 m): k = q(1 − ν′²)/E′ = 150(0.91)/30 000 = 0.004550; 8 I_s(4) = 2.7351

$$\Delta S_e = k\,[(\alpha B' I_s)_4 - 0] = 0.004550(2.7351) = \mathbf{12.4\ mm}$$

2 Глина (4–10 m): k = 150(0.75)/10,000 = 0.011250; 8 I_s(4) = 2.3398; 8 I_s(10) = 3.9643

$$\Delta S_e = 0.011250(3.9643 - 2.3398) = \mathbf{18.3\ mm}$$

В центре S_e = 12.4 + 18.3 = **30.7 mm**; в углу 3.4 + 9.8 = **13.2 mm** (в углу α = 1, B′ = B).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Boussinesq, глубина влияния и метод m_v

ТЕОРИЯ

Под центром фундамента для прямоугольника B × L — по угловому коэффициенту Newmark, для полосы — по замкнутому решению α:

$$\Delta\sigma = q\, I_z(z') \qquad I_z = 4\, I_{köşe}(m, n)\ \ (m = \tfrac{B}{2z'},\ n = \tfrac{L}{2z'}) \qquad I_{z,\text{ленточный}} = \frac{\alpha + \sin\alpha}{\pi}$$

Глубина влияния: $I_z(z')$ = p (обычно 10%); квадратный фундамент 2.09 B, при L = 1.5 B — 2.55 B, ленточный 6.34 B. Если выбрана нижняя граница профиля, расчёт заканчивается в последнем слое (в скальном грунте или плотном гравии).

Если разрез заканчивается выше z_{lim}, последний слой продолжается до z_{lim}.

Метод m_v: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$; линейный, $C_c/C_r/C_s$ не смешиваются.

В ЭТОМ РАЗРЕЗЕ

Расчётная глубина — подошва профиля (10 m); принимается жёсткая нижняя граница. Для слоя глины z = 7 m, $I_z(z' = 7) = 0.1916$.

Условие

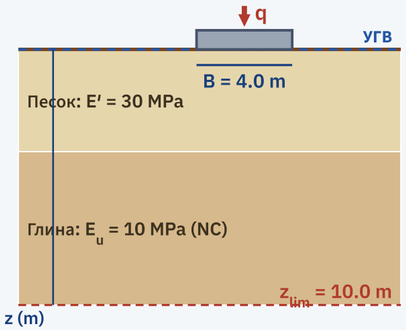
ПРИМЕР

Дано

Профиль	**песок 0–4 m:** $E' = 30$ MPa, $\nu' = 0.30$, $\gamma_{sat} = 19$ · **глина 4–10 m (NC):** $E_u = 10$ MPa, $\nu = 0.5$, $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_v = 2$ m^2/год, $\gamma_{sat} = 18$
Фундамент	**Гибкий прямоугольник 4 × 6 m,** $q = 150$ kPa**, на поверхности грунта; УГВ на поверхности; расчётная глубина 10 m (подошва профиля)**
Отсек	**глина, один слой,** $H = 6$ **m, средняя точка** $z = 7$ **m;** $f = H/(1 + e_0) = 3$ **m**
Напряжения	$\sigma'_{v0} = 9.19(4) + 8.19(3) = 61.33$ kPa

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

I_z, $\Delta\sigma$, σ'_{final} и S_c.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Boussinesq (z′ = 7 m): m = 2/7 = 0.2857; n = 3/7 = 0.4286

$$I_z = 4\,I_{köşe}(0.2857;\,0.4286) = 4(0.0479) = \mathbf{0.1916} \qquad \Delta\sigma = 150(0.1916) = 28.75 \text{ kPa}$$

2 Конечное напряжение и сжатие (NC: $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$)

$$\sigma'_{final} = 61.33 + 28.75 = 90.08 \text{ kPa}$$

$$S_c = C_c f \log\frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)\log\frac{90.08}{61.33} = \mathbf{150.2\ mm}$$

Консолидационная осадка глины составляет **150.2 mm**: примерно в **4.9 раза** больше мгновенной осадки (30.7 mm). В мягкой нормально уплотнённой (NC) глине основная осадка происходит за счёт консолидации.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Центр, угол и жёсткий фундамент

ТЕОРИЯ

Для каждого слоя суммируются мгновенная и (в связном слое) консолидационная составляющие; сумма по слоям до z_{lim} даёт осадку **центра** гибкого фундамента:

$$S = \sum \Delta S_e + \sum (\Delta S_b + \Delta S_r + \Delta S_v) \quad [+ S_{heave}]$$

$$S_{köşe} = S_{e,köşe} + S_c \qquad S_{rigid} = 0.93\, S_e + S_c \qquad S_{diff} = S_e - S_{e,köşe}$$

Для угла **только мгновенная осадка** принимает собственное значение углового прямоугольника; консолидация обусловлена путём напряжений на центральной линии и в углу принимается такой же.

Жёсткий фундамент оседает равномерно: мгновенная составляющая составляет около 0.93 от значения в центре гибкого фундамента, консолидационная равна значению в центре.

Котлован: мгновенная часть рассчитывается по q_{net}, для глины — с учётом вспучивания и повторного сжатия; при варианте «сохраняется» $S = S_e + S_c + S_{heave}$.

ЕСЛИ ПРЕОБЛАДАЕТ ГЛИНА

Поскольку консолидация в центре и в углу одинакова, в профилях с преобладанием глины **неравномерная осадка** определяется лишь разностью мгновенных составляющих.

Условие

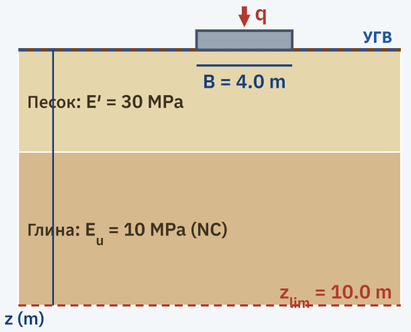
ПРИМЕР

Дано

Профиль	**песок 0–4 m:** $E' = 30$ MPa, $\nu' = 0.30$, $\gamma_{sat} = 19$ · **глина 4–10 m (NC):** $E_u = 10$ MPa, $\nu = 0.5$, $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_v = 2$ m^2/год, $\gamma_{sat} = 18$
Фундамент	**Гибкий прямоугольник 4 × 6 m,** $q = 150$ kPa**, на поверхности грунта; УГВ на поверхности; расчётная глубина 10 m (подошва профиля)**
Предыдущие примеры	S_e**: центр 30.7, угол 13.2 mm;** S_c **= 150.2 mm (примеры 1 и 2)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Полная осадка: **центр, угол, жёсткий фундамент**; разность осадок; доля мгновенной составляющей.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Суммы

$$S_{center} = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0\ mm} \qquad S_{köşe} = 13.2 + 150.2 = \mathbf{163.4\ mm}$$

$$S_{rigid} = 0.93(30.7) + 150.2 = \mathbf{178.8\ mm} \qquad S_{diff} = 30.7 - 13.2 = \mathbf{17.5\ mm}$$

	S_e (mm)	S_c (mm)	итого (mm)
центр (гибкий)	30.7	150.2	**181.0**
угол (гибкий)	13.2	150.2	**163.4**
жёсткий	28.6	150.2	**178.8**

Мгновенная осадка составляет лишь **17%** суммарной; разность осадок — 17.5 mm. Поскольку консолидация глины в центре и в углу одинакова, осадка угла составляет 90% осадки центра.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

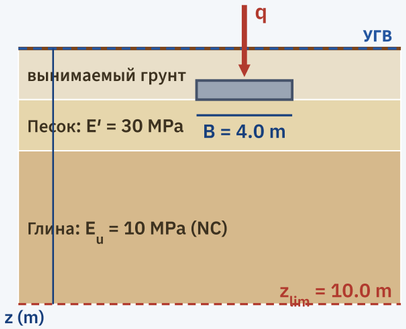
ПРИМЕР

Дано

Профиль	**песок 0–4 m ($E' = 30,\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$) · глина 4–10 m (NC; $E_u = 10,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_s = C_r = 0.06,\ \gamma_{sat} = 18$); УГВ на поверхности**
Котлован	**широкий котлован (I_{exc} = 1), глубина 2 m; фундамент на уровне дна котлована**
Фундамент	**4 × 6 m, $q_{gross} = 150$ kPa; расчётная глубина 10 m**
Отсеки	**песок 2–4 m (H = 2 m), глина 4–10 m (z = 7 m, f = 3 m)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

q_{net}, S_e; набухание глины и S_c; полная осадка (сохраняется и сбрасывается).



Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

1 Давление нетто: $q_{uplift} = \sigma'_{v0}(2\ \text{m}) = 9.19(2) = 18.38$ kPa

$$q_{net} = 150 - 18.38 = \mathbf{131.62}\ \text{kPa}$$

2 Мгновенная осадка: песок (z′ 0–2 m) k = 0.003992; глина (z′ 2–8 m) k = 0.009872 ($k = q_{net}(1 - \nu^2)/E$)

$$\text{песок}: \Delta S_e = 0.003992(1.5131 - 0) = 6.0\ \text{mm}$$

$$\text{глина}: \Delta S_e = 0.009872(3.6370 - 1.0554) = 25.5\ \text{mm}$$

Котлован снизил давление нетто со 150 до 131.6 kPa; мгновенная осадка изменилась с 30.7 до **31.5 mm** (верхние 2 m песка разработаны, глина нагружена меньше).

Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

3 Глина: траектория напряжений (z′ = 5 m: I_z = 0.3204)

$$\sigma'_{exc} = 61.33 - 18.38 = 42.95 \text{ kPa} \qquad \Delta\sigma = 150(0.3204) = 48.05 \text{ kPa}$$

$$\text{выпор} = -0.06(3)\log\frac{61.33}{42.95} = -27.8 \text{ mm} \qquad \sigma'_{final} = 42.95 + 48.05 = 91.00 \text{ kPa}$$

4 Глина NC ($\sigma'_p = \sigma'_{v0}$): S_b — восстановление набухания, S_v — сжатие по первичной ветви

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{61.33}{42.95} = 27.8 \text{ mm} \qquad S_v = 0.30(3)\log\frac{91.00}{61.33} = 154.2 \text{ mm}$$

$$S_c = S_b + S_v = \mathbf{182.1\ mm}$$

Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

	S_e (mm)	S_c (mm)	вспучивание (mm)	итого (mm)
без котлована (Пример 3)	30.7	150.2	0	**181.0**
с котлованом, **сохраняется** (от исходного грунта)	31.5	182.1	-27.8	**185.8**
после выемки грунта, **обнуляется** (от поднявшегося дна)	31.5	182.1	—	**213.6**

Общая осадка, отсчитанная от первоначальной поверхности грунта, составляет **185.8 mm** (S_e + S_c + вспучивание); отсчитанная от поднявшегося дна — **213.6 mm**. Разность равна величине вспучивания (27.8 mm).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Мгновенная осадка происходит сразу, консолидация — со временем

ТЕОРИЯ

$$T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \qquad U(T_v) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \qquad M = \frac{\pi(2m+1)}{2}$$

$$S(t) = S_e + \sum_i U_i(t)\, S_{c,i} \;\; [+ S_{heave}] \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

S_e возникает **сразу** (t = 0^+); консолидация в каждом связном слое протекает со своими C_v и H_{dr}: H_{dr} = H (при одностороннем дренировании) или H/2 (при двустороннем).

$T_{v,50}$ = 0.197; $T_{v,90}$ = 0.848; T_v < 0.05'te U = 2√(T_v/π).

Кривая является суммой кривых слоёв; значения t_{50} и t_{90} системы считываются с этой суммы. В профиле без связного слоя кривой времени нет: вся осадка мгновенная.

При выборе варианта «Сохраняется» кривая начинается с нулевого подъёма и заканчивается на нетто-деформации.

ПЕСОК + ГЛИНА

Песок оседает сразу; **форму временной кривой определяет глина**.

Условие

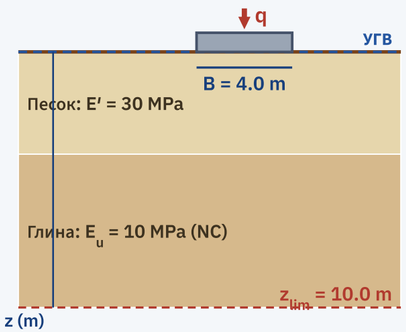
ПРИМЕР

Дано

Профиль	**песок 0–4 m:** $E' = 30$ MPa, $\nu' = 0.30$, $\gamma_{sat} = 19$ · **глина 4–10 m (NC):** $E_u = 10$ MPa, $\nu = 0.5$, $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_v = 2$ m²/год, $\gamma_{sat} = 18$
Фундамент	**Гибкий прямоугольник 4 × 6 m,** $q = 150$ kPa**, на поверхности грунта; УГВ на поверхности; расчётная глубина 10 m (подошва профиля)**
Предыдущие примеры	**S_e = 30.7 mm (Пример 1); S_c = 150.2 mm (Пример 2); котлована нет**
Дренаж	**глина дренируется сверху (песок) и снизу (жёсткое основание): двусторонний дренаж, H = 6 m**
Моменты времени	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8 лет**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

H_{dr}, t_{50}, t_{90} и S(t); осадка при t = 0^+.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Путь фильтрации и время (C_v = 2 m²/year)

$$H_{dr} = \frac{H}{2} = 3 \text{ m} \qquad t_{50} = \frac{0.197(3^2)}{2} = \mathbf{0.89} \text{ год} \qquad t_{90} = \frac{0.848(3^2)}{2} = \mathbf{3.82} \text{ год}$$

2 Начальная и конечная осадка

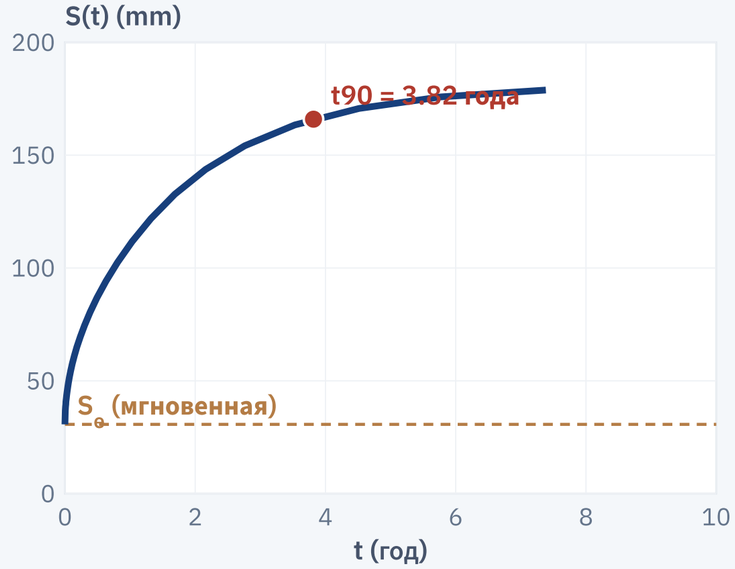
$$S(0^+) = S_e = 30.7 \text{ mm} \qquad S(\infty) = S_e + S_c = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0 \text{ mm}}$$

Сразу после приложения нагрузки осадка составляет 30.7 mm (17% от общей); 90% консолидации глины завершается за **3.82 года**.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

t (год)	U	$S_c(t)$ (mm)	$S(t) = S_e + S_c(t)$ (mm)
0.25	0.266	40.0	**71**
0.50	0.376	56.5	**87**
1.00	0.531	79.8	**110**
2.00	0.729	109.6	**140**
4.00	0.910	136.7	**167**
8.00	0.990	148.7	**179**



Полная осадка за 1 год составляет 110 mm (61% от конечного значения), за 4 года — 167 mm (92%). Кривая начинается с мгновенной осадки и растёт по мере консолидации глины.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

ПРИМЕР

Дано

Профиль	**только глина, 0–6 m (NC): $E_u = 10$ MPa, $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $\gamma_{sat} = 18$; УГВ на поверхности**
Фундамент	**4 × 6 m, $q = 150$ kPa, без котлована; расчётная глубина 6 m (нижняя граница разреза)**
Сравнение	**Модули «Упругая осадка (связный грунт)» + «Консолидация»**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Сравнить S_e, S_c и итоговую осадку по модулю «Полная осадка» с результатами двух модулей по отдельным видам осадки.

Решение

РЕШЕНИЕ

Модуль	S_e (mm)	S_c (mm)	итого (mm)
Упругая осадка: связный грунт	35.3	—	—
Консолидация	—	591.6	—
сумма двух модулей	35.3	591.6	**626.9**
Полная осадка (2D)	35.3	591.6	**626.9**

Модуль «Суммарная осадка» при профиле одного типа **в точности совпадает** с суммой двух модулей (626.9 mm). Сумма для угла фундамента равна 601.5 mm ($S_{e,corner}$ = 9.9 + S_c), для жёсткого фундамента — 624.4 mm.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

ПРИМЕР

Дано

Профиль	**Насыпной грунт, песчаный, 0–2 m (E = 12 MPa) · Глина-1, 2–7 m (E_u = 8 MPa; C_c = 0.25; OCR = 1.6) · Песок, 7–11 m (E = 35 MPa) · Глина-2, 11–20 m (E_u = 15 MPa; C_c = 0.30; OCR = 1.3) · Гравелистый песок, 20–30 m (E = 70 MPa)**
Фундамент, котлован	**10 × 15 m, q_{gross} = 120 kPa; глубина котлована 2 m (котлован в плане = фундамент); УГВ 2 m**
Расчётная глубина	**глубина влияния, p = 10%**
Результат	**Пример проекта модуля «Полная осадка»**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

S_e и S_c послойно, подъём; центр, угол, итог для жёсткого фундамента; t_{50} и t_{90}.

Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Глубина котлована и расчётная глубина

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 18(2) = 36.0 \text{ kPa} \qquad q_{net} = 120 - 36.0 = \mathbf{84.0} \text{ kPa}$$

$$z_{lim} = D_f + z' = 2 + 25.47 = \mathbf{27.47} \text{ m}$$

Насыпной грунт (0–2 m) удаляется при разработке котлована; расчёт охватывает четыре слоя от 2 m до z_{lim} = 27.5 m. Последний слой (гравелистый песок) обрезается по z_{lim}; вклад глубоких слоёв невелик.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

Слой	z (m)	S_e (mm)	S_c (mm)	вспучивание (mm)	итого = S_e + S_c + подъём (mm)
Глина-1 (CL, мягкая)	2.0 – 7.0	20.8	198.4	-62.6	156.6
Песок (SM, средней плотности)	7.0 – 11.0	5.6	—	—	5.6
Глина-2 (CH, твёрдая)	11.0 – 20.0	14.1	27.0	-6.5	34.6
Гравелистый песок (плотный)	20.0 – 27.5	1.2	—	—	1.2
Итого (центр)		**41.7**	**225.4**	**-69.1**	**198.0**

Центр **198.0 mm** = S_e 41.7 + S_c 225.4 – вспучивание 69.1 (сохраняется); угол 168.7 mm, жёсткий фундамент 195.1 mm. Время: t_{50} = 0.72 года, t_{90} = 3.71 года. Модуль даёт те же значения.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Что следует учитывать при интерпретации результатов

ТЕОРИЯ

Уровень фундамента = дно котлована; при вполне гибком фундаменте давление равномерное; жёсткий фундамент в мгновенной части ≈ 0.93 × значение для центра гибкого фундамента.

Мгновенная осадка: в каждом слое напряжения однородного полупространства (со своим ν); связный слой — недренированный (ν = 0.5), несвязный слой — дренированный; поправки на заглубление нет ($I_f = 1$).

Консолидация: одномерная по Terzaghi; гидростатическое поровое давление, УГВ откопкой не затрагивается; σ'_p — наибольшее напряжение в прошлом, при откопке оно не уменьшается; приращение напряжений принимается по вертикали под центром.

Осадка положительна, вспучивание отрицательно; переключатель в заголовке меняет знак (расчётное ядро остаётся классическим).

Вне области применения: вторичная компрессия, консолидация несвязных слоёв, Schmertmann и номограммы SPT/CPT, модуль, возрастающий с глубиной внутри слоя (слой следует разбить), жёсткость фундамента и взаимодействие «грунт — сооружение», консолидация 2D/3D, конечные элементы, несущая способность, разжижение.

Резюме

Главное

$S = S_e + S_c$: связный слой = недренированная мгновенная осадка + консолидация; несвязный слой = только дренированная упругая осадка

Мгновенная осадка (Steinbrenner): $\Delta S_e = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - \nu^2)/E \cdot [I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{top})]$; $q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$

Консолидация: путь напряжений $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_p \rightarrow \sigma'_{final}$ (C_s, C_r, C_c); для нормально уплотнённой (NC) глины $S_c = C_c\, f\, \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$

Центр $S_e + S_c$; **угол** $S_{e,corner} + S_c$; **жёсткий фундамент** $0.93\, S_e + S_c$; дифференциальная осадка = разность мгновенных составляющих

Котлован: мгновенная часть определяется по q_{net}, для глины — по набуханию + повторному сжатию; «сохраняется»: $S = S_e + S_c + S_{swelling}$, «обнуляется»: $S_e + S_c$

Время: $S(t) = S_e + \Sigma\, U_i(t)\, S_{c,i}$; $T_{v,50} = 0.197$, $T_{v,90} = 0.848$; $H_{dr} = H$ (одностороннее дренирование) или $H/2$ (двустороннее)

В профиле из грунта одного вида результат **полностью совпадает** с результатом модуля «Упругая осадка» или «Консолидация»

Список литературы

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

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage — Ch. 10–11 (stress increase, consolidation settlement, time rate).

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

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley.

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 численные примеры получены с помощью собственного расчётного ядра модуля, модуль даёт те же значения (примеры слоёв: dz = толщина слоя).

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

От теории к практике

Построить в GeoTerva собственный слоистый профиль из глины и песка; модуль одновременно даёт осадку и кривую зависимости от времени.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне
Для пробных модулей регистрация не требуется.