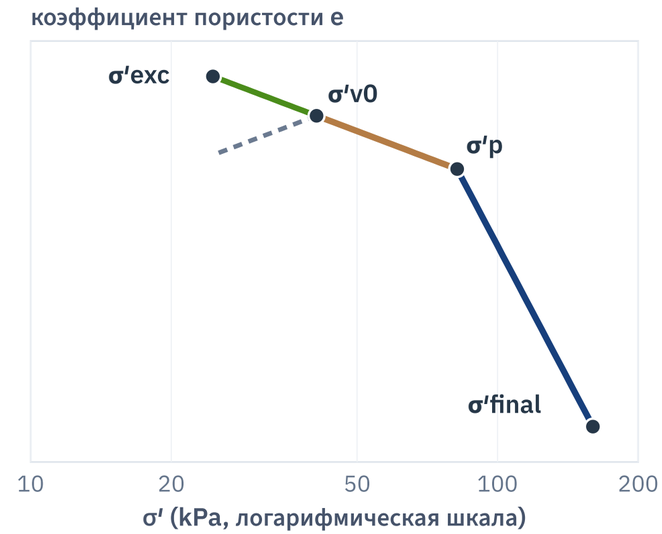
Презентация лекции по геотехнике · Осадки оснований

Консолидационная осадка

Лекция: одномерная консолидационная осадка слоя глины; путь напряжений, преконсолидация, разработка котлована и подъём дна, напряжения по Boussinesq, метод mv и время; пример расчёта по каждой теме.

- Траектория напряжений
- $C_c \cdot C_r \cdot C_s$
- Выемка и вспучивание
- Boussinesq
- Метод m_v
- Осадка во времени



Что мы изучим на этой лекции?

- Проследить **путь напряжений** глины: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{final}$ (C_s, C_r, C_c)
- Определение начальных напряжений (σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}) и **давления предварительного уплотнения** ($\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$)
- Различать разгружающее действие и набухание от **выемки котлована** и то, **от какого уровня отсчёта** измеряется осадка
- Расчёт приращения напряжений по **Boussinesq** и **глубины влияния**
- Применение **четырёх режимов** сжатия слоя (повторное сжатие, первичное сжатие); сравнение с методом $\mathbf{m_v}$
- Консолидация **во времени** (T_v, U, t_{50}, t_{90}) и построение кривой «осадка–время» для слоистого профиля

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

Грунт примера: глина мощностью 6 m, УГВ на поверхности грунта ($\sigma'_{v0} = 8.19$ z), $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_r = 0.06$; фундамент 4 × 6 m, q = 150 kPa. Осадки даны в mm.

Что рассчитывает этот модуль?

ТЕОРИЯ

Все слои в профиле — глины; другие грунты ввести нельзя. Модуль рассчитывает **первичную консолидацию** глины: при приложении нагрузки вода медленно отжимается, и глина сжимается вдоль пути напряжений.

Мгновенная (упругая) осадка рассматривается в модулях «Упругая осадка»; сумма обеих находится в модуле «Полная осадка (2D)».

Решение **аналитическое**: приращение напряжений по Boussinesq, путь напряжений по слоям и теория Terzaghi; гидростатическое поровое давление; конечные элементы не используются.

Вне рамок модуля: несвязные слои, вторичное сжатие (C_α), осадка песков по SPT/CPT, осадка скальных грунтов, консолидация в 2D/3D, несущая способность, разжижение.

ПРАВИЛО ЗНАКОВ

Осадка **положительна**, подъём **отрицателен**. Чистая деформация $S_{net} = S_c + S_{heave}$.

Не за один шаг от начального до конечного напряжения

ТЕОРИЯ

Расчёт никогда не идёт от начального напряжения к конечному **за один шаг**. Разработка котлована уменьшает эффективное напряжение, и глина **набухает** по прямой разгрузки (C_s). Когда сооружение нагружает её повторно, глина сначала идёт по той же прямой обратно до σ'_{v0} (вспучивание снимается); затем повторно сжимается по C_r до σ'_p, а если конечное напряжение превышает σ'_p — сжимается по прямой первичного сжатия (C_c):

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final}$$

σ'_p — максимальное напряжение в прошлом; **оно не уменьшается при разработке котлована**.

Цикл нагружения–разгрузки **замыкается** при σ'_{v0}: нагрузка, лишь восстанавливающая снятый вышележащий грунт, не вызывает осадки относительно начального состояния — независимо от C_s и C_r.

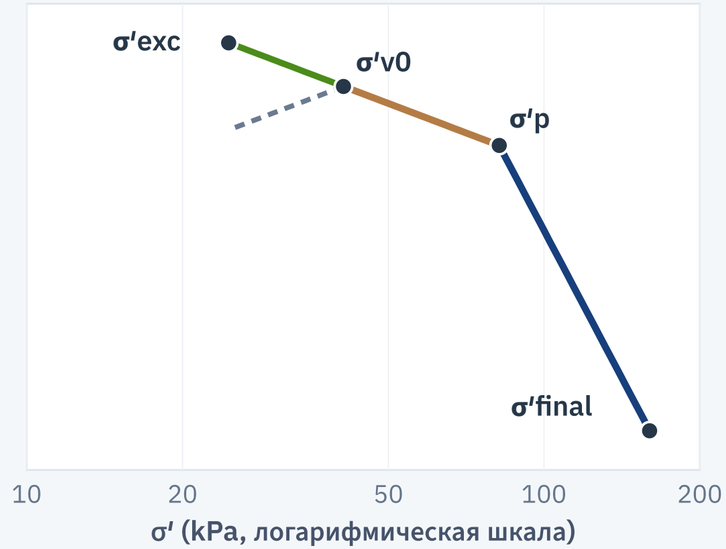


Схема: штриховая линия — разгрузка, зелёная — повторное нагружение (C_s), оранжевая — повторное сжатие (C_r), синяя — первичное сжатие (C_c).

В средней точке каждого отсека

ТЕОРИЯ

Каждый слой между уровнем фундамента и расчётной глубиной z_{lim} разбивается на **подслои** толщиной не более Δz (на УГВ разрезаются); каждое напряжение вычисляется в середине подслоя:

$$\sigma_{v0} = \sum \gamma_i h_i \qquad u_0 = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$$

γ используется выше УГВ, γ_{sat} — ниже; γ_w = 9.81 kN/m³.

Начальные напряжения в грунте служат **базой отсчёта** для каждого последующего этапа.

Чем тоньше отсек, тем точнее результат; при расчёте вручную один отсек даёт приближённый результат.

УГВ НА ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА

Для γ_{sat} = 18 получаем γ′ = 18 − 9.81 = 8.19 kN/m³ и σ'_{v0} = 8.19 z. Во всех последующих примерах используется этот грунт.

Условие

ПРИМЕР

Дано

Грунт	$\gamma = 17$ kN/m^3 **(выше УГВ),** $\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3 **(ниже)**
УГВ	**1.5 m от поверхности грунта**
Глубины	**z = 1.5; 3.0; 4.5; 6.0 m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить значения σ_{v0}, u_0, σ'_{v0} на каждой глубине.

Решение

РЕШЕНИЕ

1 z = 3.0 m (УГВ 1.5 m)

$$\sigma_{v0} = 17(1.5) + 18(1.5) = 52.50 \text{ kPa}$$

$$u_0 = 9.81(3.0 - 1.5) = 14.715 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{v0} = 52.50 - 14.715 = \mathbf{37.785} \text{ kPa}$$

z (m)	σ_{v0} (kPa)	u_0 (kPa)	σ'_{v0} (kPa)
1.5	25.50	0.00	**25.50**
3.0	52.50	14.71	**37.78**
4.5	79.50	29.43	**50.07**
6.0	106.50	44.15	**62.35**

Ниже УГВ σ'_{v0} нарастает **медленнее** (наклон линии $\gamma' = 8.19$ kN/m³): при z = 6 m полное напряжение 106.5, эффективное лишь 62.4 kPa.

Проверить решение в GeoTerva ↗

$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$ или лабораторное значение

ТЕОРИЯ

Для каждой модели используется **одно определение**: либо коэффициент переуплотнения OCR, либо лабораторное значение σ'_p:

$$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0} \qquad \text{или} \qquad \sigma'_p = \sigma'_{p,lab} \ \ (\geq \sigma'_{v0})$$

OCR = 1: нормально уплотнённая глина; $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$, и любое нагружение сверх начального напряжения является первичным сжатием.

Если лабораторное значение σ'_p ниже σ'_{v0}, оно с предупреждением повышается до σ'_{v0}: **недоуплотнённая глина выходит за рамки модуля**.

σ'_p отражает максимальное напряжение в прошлом и не снижается при разработке котлована.

О ЧЁМ ГОВОРИТ OCR?

OCR = σ'_p/σ'_{v0}. Большое значение OCR означает широкую область повторного сжатия, в которой глина под нагрузкой сначала сжимается с **малым C_r**.

Условие

ПРИМЕР

Дано

Отсек	**средняя точка $z = 3$ m: $\sigma'_{v0} = 24.57$ kPa (УГВ на поверхности, $\gamma_{sat} = 18$)**
Случаи	**(a) $OCR = 3$ · (b) лабораторные значения $\sigma'_p = 60$ kPa · (c) лабораторные значения $\sigma'_p = 20$ kPa**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

В каждом случае **σ'_p** и **OCR**; интерпретировать состояние.

Решение

РЕШЕНИЕ

1 (a) OCR задан и (b) лабораторное значение

$$\text{(a)}: \ \sigma'_p = 3(24.57) = \mathbf{73.71}\ \text{kPa} \qquad \text{(b)}: \ OCR = \frac{60}{24.57} = \mathbf{2.44}$$

2 (c) лабораторное значение ниже σ′v0

$$\sigma'_{p,lab} = 20 < \sigma'_{v0} \ \Rightarrow \ \sigma'_p = \mathbf{24.57}\ \text{kPa},\ OCR = 1$$

(a) и (b) — переуплотнённая глина (σ′p > σ′v0); для (c) модуль выдаёт предупреждение и принимает глину **нормально уплотнённой** (σ′p = σ′v0 = 24.57 kPa): недоуплотнённая глина вне области применения.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Разгрузка и вспучивание

ТЕОРИЯ

Снимаемая нагрузка — это **начальное эффективное бытовое напряжение** на уровне дна котлована (УГВ не меняется; ниже воды снимаемый вес вычисляется с γ′). Разгрузка распределяется с учётом влияния по Boussinesq плана котлована I_{exc} (для широкого котлована $I_{exc} = 1$):

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(D_{exc}) \qquad \Delta\sigma_{exc} = -q_{lift}\, I_{exc}(z') \qquad \sigma'_{exc} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_{exc}$$

$$\Delta H_{heave} = -\frac{C_s\,\Delta H}{1+e_0}\,\log_{10}\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{exc}}$$

Набухание **отрицательно** (осадка +, набухание −). Если C_s не задан, принимается $C_s = C_r$, что указывается в отчёте.

Давление нетто $q_{net} = q_{gross} - q_{uplift}$ только приводится в отчёте; расчёт не выполняется за один шаг с давлением нетто, прослеживается путь напряжений.

NEDEN KABARMA?

При разработке котлована эффективное напряжение уменьшается, и глина набухает. Когда сооружение вновь нагружает основание, набухание возвращается: это **повторное сжатие набухшего грунта**.

Δσ под центром фундамента

ТЕОРИЯ

$$\Delta\sigma_{load} = q_{gross}\, I_z(z') \qquad z' = z - D_f$$

Прямоугольник B × L под его центром: через угловой коэффициент Newmark $I_z = 4 \cdot I_{corner}$(m = B/2z′, n = L/2z′):

$$I_{köşe} = \frac{1}{4\pi}\left[\frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2n^2}\cdot\frac{V+1}{V} + \tan^{-1}\frac{2mn\sqrt{V}}{V - m^2n^2}\right] \qquad V = m^2 + n^2 + 1$$

(Если $V < m^2n^2$, член с арктангенсом увеличивается на π). **Полоса** (ширина B) под своей осевой линией: $I_z = (\alpha + \sin\alpha)/\pi$, $\alpha = 2\tan^{-1}(B/2z')$. При z′ = 0 $I_z = 1$.

$$\sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

ПРИМЕЧАНИЕ

Приращение напряжений принимается по вертикали под центром фундамента (слои и анализ во времени); в областях цветовых полос для точек за пределами фундамента нагрузка разбивается на угловые прямоугольники.

Условие

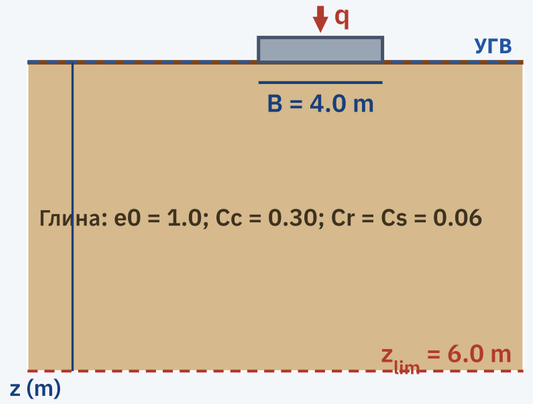
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**Прямоугольник 4 × 6 m, $q = 150$ kPa, на поверхности грунта ($D_f = 0$)**
Точка	**середина слоя z′ = 3 m, под центром**
Сравнение	**Полоса шириной B = 4 m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

I_z и **Δσ**; для полосы те же значения.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Прямоугольник: m = B/2z′ = 2/3 = 0.667; n = L/2z′ = 1.0

$$V = m^2 + n^2 + 1 = 2.4444, \quad m^2n^2 = 0.4444, \quad \sqrt{V} = 1.5635$$

$$T_1 = \frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2n^2} \cdot \frac{V+1}{V} = \frac{2.0846}{2.8889} \cdot \frac{3.4444}{2.4444} = 1.0168$$

$$T_2 = \tan^{-1}\frac{2.0846}{2.0000} = 0.8061 \qquad I_{köşe} = \frac{T_1 + T_2}{4\pi} = 0.1451$$

2 Прямоугольник и полоса

прямоугольный : $I;_z = 4(0.1451) = \mathbf{0.5803} \;\Rightarrow\; \Delta\sigma = 150(0.5803) = \mathbf{87.04}$ kPa

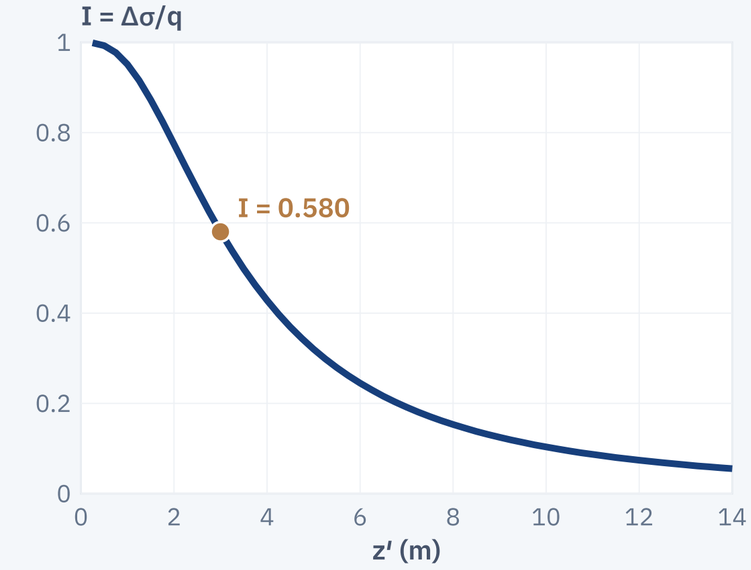
ленточный : $\alpha = 2\tan^{-1}\frac{4}{6} = 1.1760 \;\Rightarrow\; I_z = \frac{1.1760 + 0.9231}{\pi} = 0.6682$

$$\Delta\sigma = 150(0.6682) = \mathbf{100.22}\ \text{kPa}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

z′ (m)	I_z	Δσ (kPa)
0.5	0.9927	148.9
1.0	0.9513	142.7
2.0	0.7746	116.2
3.0	0.5803	87.0
4.0	0.4283	64.2
6.0	0.2449	36.7
8.0	0.1532	23.0
10.0	0.1034	15.5



В середине слоя Δσ = **87.0 kPa** (58% от q); узкая полоса (при том же B) даёт 100.2 kPa: **длинный фундамент воздействует глубже**. Прирост напряжений составляет 10% даже при z′ = 10 m.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Глубина влияния: I(z′) = p

ТЕОРИЯ

Приращение напряжения уменьшается с глубиной, но никогда не обращается в нуль; для суммы сжатий слоёв нужна нижняя граница: **расчётная глубина z_{lim}**. По правилу глубины влияния глина сжимается до тех пор, пока приращение Boussinesq под центром не снизится до доли **p** от приложенного давления (обычно p = 10 %):

$$I_z(z') = p \;\Rightarrow\; z_{lim} = D_f + z'$$

Тот же коэффициент влияния управляет и разгрузкой от котлована с тем же планом; поэтому глубина одна и та же, считывается ли она по q_{gross} или по q_{net}.

Если профиль заканчивается выше z_{lim}, последний слой продолжается до z_{lim} с теми же свойствами; если ниже — грунт ниже z_{lim} не сжимается.

Альтернативное правило — **нижняя граница профиля**: предполагается жёсткое основание. (Критерий Δσ = 0.2 σ'_{v0} для малого фундамента на глубине приводит к большей глубине; правило модуля зависит только от геометрии.)

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

Фундаменты	**(a) 4 × 6 m, p = 10% и 20% · (b) плитный фундамент 20 × 30 m, p = 10% и 20%**
Правило	**глубина влияния; $D_f = 0$**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

В каждом случае **z′** и z_{lim}; проверка I(z′) для 4 × 6 m.

Решение

РЕШЕНИЕ

1 Проверка: 4 × 6 m, p = 10% ⇒ z′ = 10.19 m

$$m = \frac{2}{10.19} = 0.1963,\ n = \frac{3}{10.19} = 0.2945 \ \Rightarrow\ I_z = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$

Фундамент	p = %10: z′ (m)	p = %20: z′ (m)
4 × 6 m (L/B = 1.5)	10.19 (2.55 B)	6.82 (1.70 B)
Фундаментная плита 20 × 30 m	50.9 (2.55 B)	34.1 (1.70 B)

z′ **пропорциональна размеру фундамента**: для фундамента 4 × 6 m z_{lim} = 10.19 m, для плитного фундамента 20 × 30 m — **50.9 m**. Для плиты в расчёт принимается глина, сжимаемая до глубины около 51 m.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Защемление отсека при повторном нагружении

ТЕОРИЯ

$f = \Delta H/(1 + e_0)$ для слоя; при $\sigma'_{exc} \le \sigma'_{v0} \le \sigma'_p$ сжатие слоя в зависимости от положения конечного напряжения:

Условие	Защемление отсека при повторном нагружении
$\sigma'_{exc} \le \sigma'_{final} \le \sigma'_{v0}$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{exc})$: часть набухания восстанавливается
$\sigma'_{v0} < \sigma'_{final} \le \sigma'_p$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}) + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_{final}$	$S_b + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_p/\sigma'_{v0}) + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_p)$
$\sigma'_p = \sigma'_{v0} < \sigma'_{final}$ (NC)	$S_b + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{final} < \sigma'_{exc}$	Дополнительное набухание с C_s (отрицательное)

ЕСЛИ КОТЛОВАНА НЕТ

$\sigma'_{exc} = \sigma'_{v0}$ и $S_b = 0$: классическое повторное сжатие и первичная компрессия (по виргинной ветви) — от начального напряжения.

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v) \qquad S_{net} = S_c + S_{heave}$$

Условие

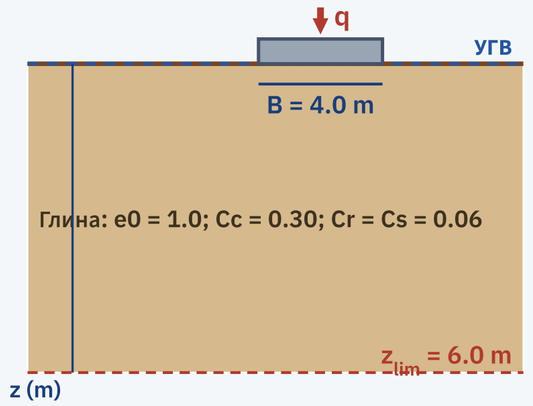
ПРИМЕР

Дано

Грунт	**один слой глины, толщина 6 m;** $\gamma_{sat} = 18$ kN/m^3**; УГВ на поверхности грунта;** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$
Фундамент	**прямоугольник 4 × 6 m,** $q = 150$ kPa**, на поверхности грунта (без котлована)**
Отсек	**один отсек, H = 6 m, средняя точка** $z = 3$ m **:** $\sigma'_{v0} = 8.19\,z = 24.57$ kPa
Переуплотнение	**(a) OCR = 1 (NC) · (b) OCR = 6 · (c) OCR = 3**
Приращение напряжений	$\Delta\sigma = 150\,I_z(3) = 87.04$ kPa **(Пример 3)** ⇒ $\sigma'_{final} = 111.61$ kPa

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Для каждой глины — **режим** и консолидационная осадка $\mathbf{S_c}$.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Общее: f = H/(1 + e_0) = 6/2 = 3 m; log($\sigma'_{final}/\sigma'_{v0}$) = log(111.61/24.57) = 0.6573

$$\text{(a) NC}: \quad S_v = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)(0.6573) = \mathbf{591.6\ mm}$$

2 (b) OCR = 6: σ'_p = 6(24.57) = 147.4 kPa > σ'_{final} ⇒ только повторное сжатие

$$S_r = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.06(3)(0.6573) = \mathbf{118.3\ mm}$$

Та же глина, та же нагрузка: нормально уплотнённая глина даёт осадку **591.6 mm**, а при OCR = 6 — **118.3 mm**; разница обусловлена отношением C_c/C_r = 5.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 (c) OCR = 3: $\sigma'_p = 3(24.57) = 73.71$ kPa < $\sigma'_{final} = 111.61$ ⇒ повторное сжатие + сжатие по первичной ветви

$$S_r = 0.06(3)\log\frac{73.71}{24.57} = 85.9 \text{ mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{111.61}{73.71} = 162.2 \text{ mm} \qquad S_c = \mathbf{248.0\ mm}$$

OCR	σ'_p (kPa)	режим	S_r (mm)	S_v (mm)	S_c (mm)
1	24.6	ненарушенный	0	591.6	**591.6**
6	147.4	повторное сжатие	118.3	0	**118.3**
3	73.7	повторное + первичное сжатие	85.9	162.2	**248.0**



Проверить решение в GeoTerva ↗

От исходного грунта или от вспучившегося дна?

ТЕОРИЯ

После разработки котлована устраивается фундамент: осадка зависит от того, **от какого начала отсчёта** измеряются перемещения (выбор варианта *перемещения после разработки котлована* на этапе разработки):

Сохраняется — от исходного грунта (по умолчанию): поднятие (набухание) показывается отдельно; осадка фундамента — это итоговая деформация в конце нагружения: $\mathbf{S = S_c + S_{heave}}$ = суммарное сжатие сверх σ'_{v0}. Нагрузка, не превышающая вес удалённого вышележащего грунта, даёт S = 0; если она меньше, грунт остаётся выше исходного уровня (указывается в отчёте, осадка 0).

Перед нагружением обнуляется: перемещения этапа разработки котлована обнуляются; осадка отсчитывается от поднявшегося (вспучившегося) дна котлована: $\mathbf{S = S_c = S_b + S_r + S_v}$. Повторное сжатие вспучивания считается осадкой: полностью компенсированный фундамент оседает на столько, на сколько вспучилось дно. Если котлован оставался открытым до возведения здания и вспучивание успело развиться, этот ответ является правильным.

Обе величины всегда выводятся на печать; от выбора зависят значение, приводимое в отчёте как осадка фундамента, кривая осадки во времени и результат.

РЕЗЮМЕ

Сохраняется: $S = S_c + S_{heave}$ (малая).
Обнуляется: $S = S_c$ (большая).

Условие

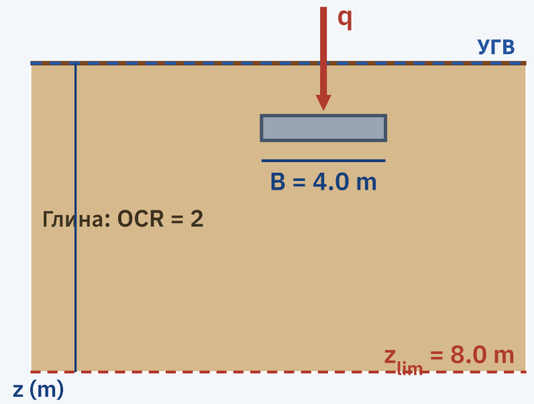
ПРИМЕР

Дано

Грунт	**глина 0–8 m, $\gamma_{sat} = 18$, УГВ на поверхности;** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$; $OCR = 2$
Котлован	**широкий котлован (I_{exc} = 1), глубина 2 m; фундамент на уровне дна котлована**
Фундамент	**4 × 6 m,** $q_{gross} = 100$ kPa
Отсек	**один слой 2–8 m,** $H = 6$ **m,** $z = 5$ **m,** $f = 3$ **m:** $\sigma'_{v0} = 8.19(5) = 40.95$ kPa

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

σ'_{exc}, подъём дна, S_b, S_r, S_v, S_c; осадка фундамента (по исходному грунту и после обнуления).



Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

1 Выемка грунта: снятая нагрузка, разгрузка и вспучивание

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 8.19(2) = 16.38 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{exc} = 40.95 - 16.38 = \mathbf{24.57} \text{ kPa}$$

$$\Delta H_{heave} = -0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = -0.06(3)(0.2218) = \mathbf{-39.9\ mm}$$

2 Нагружение: $I_z(z' = 3) = 0.5803$ (Пример 3); $\sigma'_p = 2(40.95) = 81.9$ kPa

$$\Delta\sigma = 100(0.5803) = 58.03 \text{ kPa} \quad \sigma'_{final} = 24.57 + 58.03 = \mathbf{82.60} \text{ kPa}$$

Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

3 Режим: $\sigma'_{v0} < \sigma'_p = 81.9 < \sigma'_{final} = 82.60$

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = 39.9\ \text{mm} \qquad S_r = 0.06(3)\log\frac{81.9}{40.95} = 54.2\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{82.60}{81.9} = 3.3\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

При повторном нагружении сначала восстанавливается набухание (S_b = 39.9 mm — всё набухание целиком), затем следует 54.2 mm повторного сжатия по C_r и 3.3 mm сжатия по виргинной ветви, лишь немного превышающего σ'_p.

Решение (3/3)

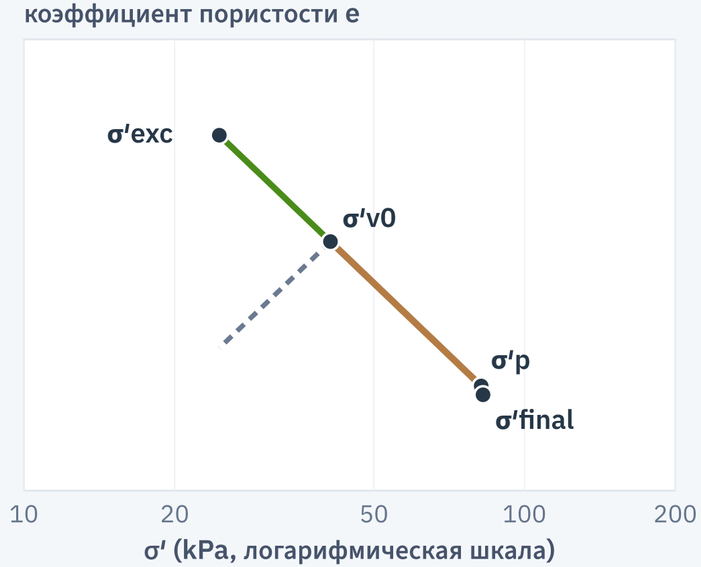
РЕШЕНИЕ

4 Осадка фундамента

сохраняется : $S = S_c + S_{heave} = 97.4 - 39.9 = \mathbf{57.5\ mm}$

обращается в нуль : $S = S_c = \mathbf{97.4\ mm}$

Осадка, отсчитываемая от первоначальной поверхности грунта, составляет **57.5 mm**; отсчитываемая от вспученного дна — **97.4 mm**. Разница равна величине вспучивания (39.9 mm): выбор базы отсчёта изменяет результат на 69%.



Проверить решение в GeoTerva ↗

Линейный путь: $\Delta H = m_v \, \Delta\sigma' \, H$

ТЕОРИЯ

Это отдельный и **линейный** путь расчёта: один и тот же m_v используется и при разгрузке, и при повторном нагружении; C_c, C_r, C_s и e_0 не участвуют:

$$\Delta H = m_v \, \Delta\sigma' \, H_{slice}$$

$$\text{выпор} = -m_v \left(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc}\right) H \qquad S_c = m_v \left(\sigma'_{final} - \sigma'_{exc}\right) H$$

Часть S_c до σ'_{v0} — восстанавливаемое набухание (S_b).

Поскольку зависимость линейна, петля замыкается сама собой.

Единица m_v — 1/kPa (коэффициент объёмной сжимаемости); значение следует выбирать по интервалу напряжений.

ОТЛИЧИЕ ОТ e – log σ′

Метод m_v не учитывает уровень напряжений (σ'_p отсутствует): любое приращение напряжения даёт одинаковое сжатие.

Условие

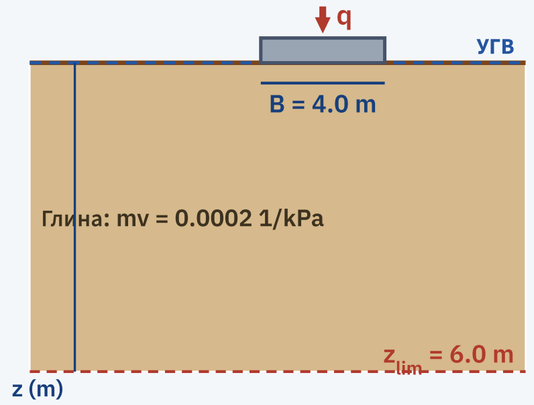
ПРИМЕР

Дано

Грунт	**6 m глины, $m_v = 0.0002$ 1/kPa, УГВ на поверхности**
Случай (a)	**без крепления: 4×6 m, $q = 150$ kPa, $\Delta\sigma = 87.04$ kPa (пример 3)**
Случай (b)	**Котлован и фундамент из примера 6 (котлован 2 m, $q = 100$ kPa, слой 2–8 m)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

S_c в каждом случае; для (b) — вспучивание, S_b и осадка нетто.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 (a) Без котлована

$$S_c = m_v\,\Delta\sigma'\,H = 0.0002(87.04)(6) = \mathbf{104.4\ mm}$$

2 (b) С котлованом: σ'_{v0} = 40.95; σ'_{exc} = 24.57; $\Delta\sigma_{load}$ = 58.03; σ'_{final} = 82.60 kPa

$$\text{выпор} = -0.0002(40.95 - 24.57)(6) = -19.7\ \text{mm} = -S_b$$

$$S_r = 0.0002(82.60 - 40.95)(6) = 50.0\ \text{mm} \qquad S_c = S_b + S_r = \mathbf{69.6\ mm}$$

Осадка нетто (от первоначального грунта) S = S_c + вспучивание = **50.0 mm**; осадку вызывает только приращение 41.65 kPa, превышающее σ'_{v0}. При линейном пути в методе e – log σ′ влияние σ'_p отсутствует.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Terzaghi: T_v, U и t

ТЕОРИЯ

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

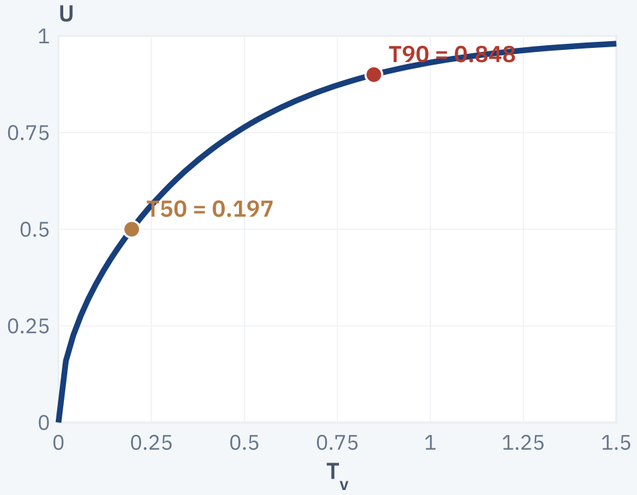
$$S_i(t) = U_i(t)\, S_{c,i} \qquad S(t) = \sum S_i(t) \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

H_{dr} = H (одностороннее дренирование) или H/2 (двустороннее); H — толщина слоя ниже уровня подошвы фундамента (для последнего слоя, выходящего за пределы профиля, — до z_{lim}).

$T_{v,50}$ = 0.197; $T_{v,90}$ = 0.848. При T_v < 0.05 используется решение для раннего времени $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

Слои с различными значениями C_v и H_{dr} консолидируются с разной скоростью: кривая профиля представляет собой **сумму кривых слоёв**; собственные значения t_{50} и t_{90} считываются с этой суммы.

Кривая относится к осадке от нагрузки S_c; набухание считается завершившимся до приложения нагрузки.



Условие

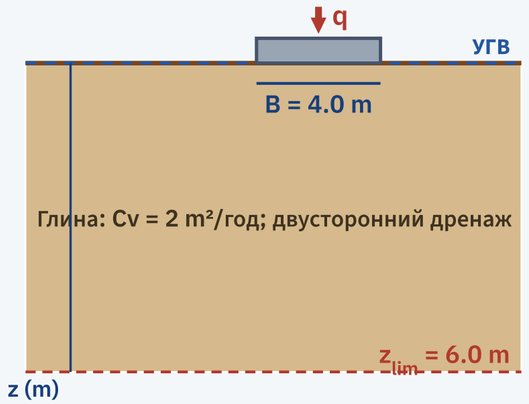
ПРИМЕР

Дано

Глина	**6 m, нормально уплотнённый (Пример 5a):** $S_c = 591.6$ **mm**
Консолидация	$C_v = 2$ m^2/год**; дренаж сверху и снизу (двусторонний)**
Моменты времени	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8 лет**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

H_{dr}, t_{50}, t_{90} и S(t); t_{90} при одностороннем дренаже.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Путь фильтрации и характерные времена

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

2 Односторонний дренаж (H_{dr} = 6 m)

$$t_{90} = \frac{0.848(6^2)}{2} = \mathbf{15.3} \text{ год}$$

При двустороннем дренировании путь фильтрации сокращается вдвое, а время уменьшается **в четыре раза**: t_{90} = 3.82 года против 15.3 года при одностороннем.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

t (год)	$T_v = C_v t/H_{dr}^2$	U	$S(t) = U\,S_c$ (mm)
0.25	0.056	0.266	**157**
0.50	0.111	0.376	**222**
1.00	0.222	0.531	**314**
2.00	0.444	0.729	**431**
4.00	0.889	0.910	**538**
8.00	1.778	0.990	**586**

За 1 год завершается лишь 53 % осадки, за 4 года — 91 % (S_c = 592 mm); за 8 лет U = 0.990. При малых значениях T_v (< 0.05) применяется $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**4 × 6 m, q = 150 kPa, на поверхности грунта; УГВ на поверхности (γ_{sat} = 18)**
Слой A (0–4 m)	**мягкий, NC: $e_0 = 1.10,\ C_c = 0.35,\ C_r = 0.07$; $C_v = 1$; двустороннее дренирование**
Слой B (4–8 m)	**жёсткая, $OCR = 2$: $e_0 = 0.80,\ C_c = 0.20,\ C_r = 0.04$; $C_v = 3$; односторонний дренаж**
Расчёт	**нижняя граница разреза (8 m); каждый слой принимается за один расчётный слой (A: z = 2 m, B: z = 6 m)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Значение $\mathbf{S_c}$, t_{50} и t_{90} каждого слоя; кривая S(t) системы.

Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

1 A: z = 2 m, σ'_{v0} = 16.38; $I_z(2)$ = 0.7746 ⇒ Δσ = 116.19; σ'_{final} = 132.57; f = 4/2.10 = 1.9048 m; NC

$$S_{c,A} = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.35(1.9048) \log \frac{132.57}{16.38} = \mathbf{605.4\ mm}$$

2 B: z = 6 m, σ'_{v0} = 49.14; σ'_p = 98.28; $I_z(6)$ = 0.2449 ⇒ Δσ = 36.74; σ'_{final} = 85.88 < σ'_p; f = 4/1.80 = 2.2222 m

$$S_{c,B} = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.04(2.2222) \log \frac{85.88}{49.14} = \mathbf{21.6\ mm}$$

Полная консолидационная осадка составляет **627.0 mm**: мягкий нормально уплотнённый верхний слой даёт 97% суммарной; жёсткий переуплотнённый нижний слой — лишь 21.6 mm.

Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

3 Путь фильтрации и время ($t = 0.197\ H_{dr}^2/C_v$; $0.848\ H_{dr}^2/C_v$)

$$A:\ H_{dr} = 2\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(4)}{1} = 0.788,\ t_{90} = \frac{0.848(4)}{1} = 3.39\ \text{год}$$

$$B:\ H_{dr} = 4\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(16)}{3} = 1.051,\ t_{90} = \frac{0.848(16)}{3} = 4.52\ \text{год}$$

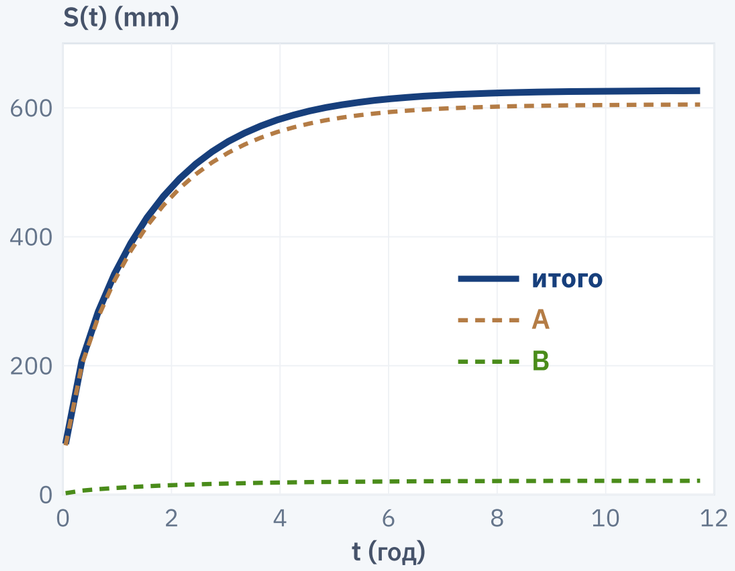
Кривая системы представляет собой сумму $S(t) = U_A(t)\ S_A + U_B(t)\ S_B$; её собственные времена определяются по этой сумме: **t_{50} = 0.794 года, t_{90} = 3.43 года** (близко к доминирующему слою A).

Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

t (год)	S_A (mm)	S_B (mm)	S(t) (mm)	U
0.5	242	7.4	**249**	0.397
1.0	340	10.5	**351**	0.560
2.0	463	14.6	**477**	0.761
5.0	583	19.8	**603**	0.961
10.0	604	21.4	**626**	0.998
20.0	605	21.6	**627**	1.000

За 1 год завершается 56% осадки, за 5 лет — 96%; осадка заканчивается примерно через 10 лет (627 mm). Кривая определяется **мягким слоем A**.



Проверить решение в GeoTerva ↗

Что следует учитывать при интерпретации результатов

ТЕОРИЯ

Уровень фундамента = дно котлована (при отсутствии котлована — поверхность грунта); **гидростатическое** поровое давление; УГВ не зависит от разработки котлована.

Приращение напряжения берётся **по вертикали под центром фундамента** (слои и анализ во времени); цветовые зоны следуют одному и тому же пути напряжений в каждой точке.

e_0 — начальный коэффициент пористости на каждом этапе; **вторичная компрессия (C_α) отсутствует**.

Осадка считается положительной, подъём (набухание) — отрицательным; переключатель в заголовке меняет знак и переводит отображение на положительное направление вверх (расчётное ядро остаётся классическим).

Цветовые полосы: области, быстро убывающие с глубиной, такие как осадка, набухание и деформация, окрашиваются по классам $1 \cdot 1.5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \times 10^n$; равные полосы сжали бы нижнюю область до одного цвета.

Резюме

Главное

Путь напряжений: $\sigma'_{v0} \to \sigma'_{exc} \to \sigma'_{v0}$ (C_s) $\to \sigma'_p$ (C_r) $\to \sigma'_{final}$ (C_c); $\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$, при откопке не уменьшается

Сжатие слоя $f = \Delta H/(1 + e_0)$: NC: $C_c\, f \log(\sigma'_{final}/\sigma'_{v0})$; OC и $\sigma'_{final} \le \sigma'_p$: $C_r\, f \log(\ldots)$; $\sigma'_{final} > \sigma'_p$: части $C_r + C_c$

Разработка котлована: $q_{unload} = \sigma'_{v0}(D_{exc})$, вспучивание $= -C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc})$; $S = S_c + S_{heave}$ (исходный грунт) или S_c (с обнулением)

Boussinesq: $\Delta\sigma = q\, I_z(z')$; центр прямоугольника $4\, I_{corner}$, полоса $(\alpha + \sin\alpha)/\pi$; $\mathbf{z_{lim}}$: $I(z') = p$ (квадрат — 2.09 B, L = 1.5 B — 2.55 B, полоса — 6.34 B)

Метод m_v: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$, линейный; подъём (набухание) $= -m_v(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\, H$

Время: $T_v = C_v\, t/H_{dr}^2$; $T_{v,50} = 0.197$, $T_{v,90} = 0.848$; $H_{dr} = H$ (односторонний дренаж) или $H/2$ (двусторонний); $S(t) = \Sigma\, U_i\, S_{c,i}$

Список литературы

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

Newmark, N.M. (1935). Simplified computation of vertical pressures in elastic foundations. Univ. of Illinois Bulletin 429.

Das, B.M. (2016). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C. (2011). An Introduction to Geotechnical Engineering, 2nd ed. Pearson.

Craig, R.F., Knappett, J.A. (2012). Craig’s Soil Mechanics, 8th ed. Spon.

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

Рассчитать примеры из этой презентации в GeoTerva шаг за шагом; в модуле количество слоёв и котлован вводятся свободно.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне
Для пробных модулей регистрация не требуется.