Лекция по геотехнике · Подпорные стены

Гравитационная подпорная стена

Лекция: внешняя устойчивость каменной или бетонной гравитационной подпорной стены; стена и перемещающийся вместе с ней грунт, активное и пассивное давление грунта, вода, противодавление и землетрясение; проверки на сдвиг, опрокидывание и несущую способность; пример расчёта по каждой теме.

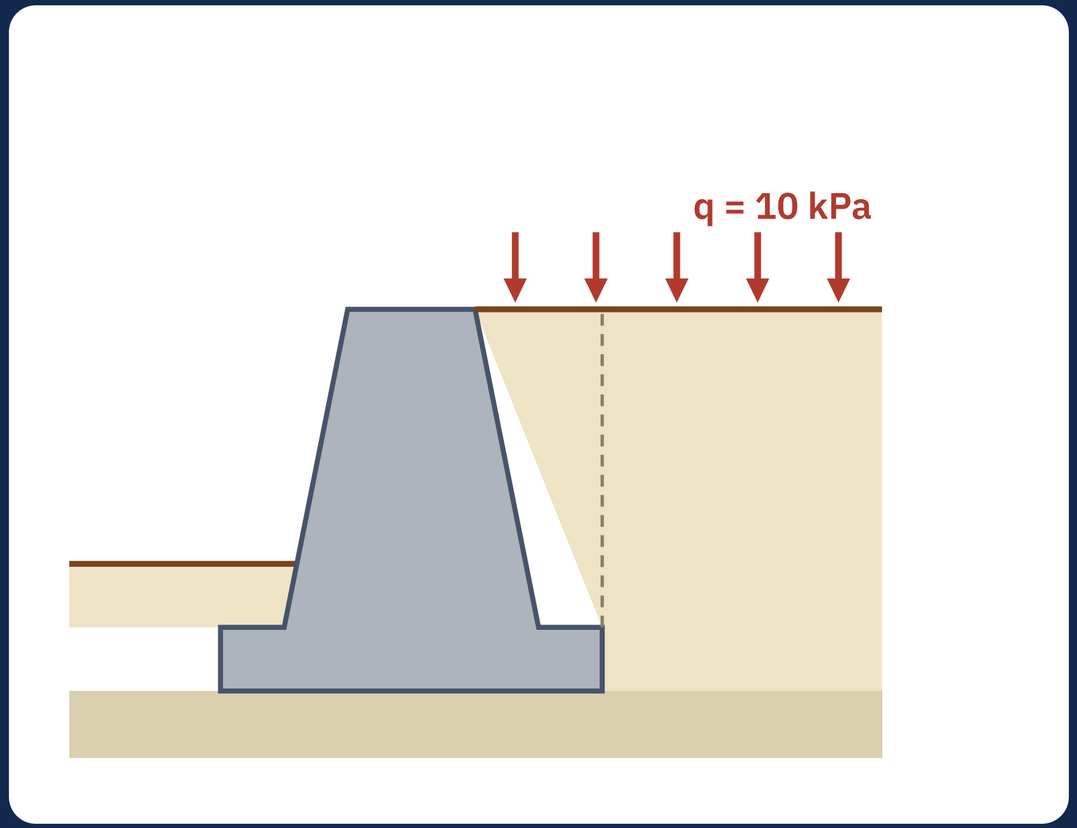
Сдвиг · опрокидывание · несущая способность

Rankine · Coulomb · Mononobe–Okabe

Вода и противодавление

Инерция при землетрясении

Ведомость сил



Что мы изучим на этой лекции?

- Расчёт **геометрии** и веса гравитационной подпорной стены путём разбиения на части (площадь, центр тяжести, плечо момента)
- **Блок грунта**, движущийся вместе со стеной, и **вертикальная плоскость давления**, проходящая через заднюю кромку фундамента
- **Активное** давление (Rankine = Coulomb, на вертикальной плоскости), пригрузка, **передний пассивный отпор** (K_{mob}) и силы **воды + противодавления**
- Проверки **на сдвиг, опрокидывание и несущую способность** с использованием **ведомости сил** и единого правила знаков ($M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$)
- Учёт при землетрясении распора по **Mononobe–Okabe**, сейсмического приращения и инерции стены
- Чтение результата: коэффициенты запаса, эксцентриситет, напряжения под подошвой

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

Всё приведено на 1.00 m длины стены (kN/m, kN·m/m); давления — в kPa. Пример стены: каменная, H = 3 m (22 kN/m³).

Что решается и как строится чертёж?

ТЕОРИЯ

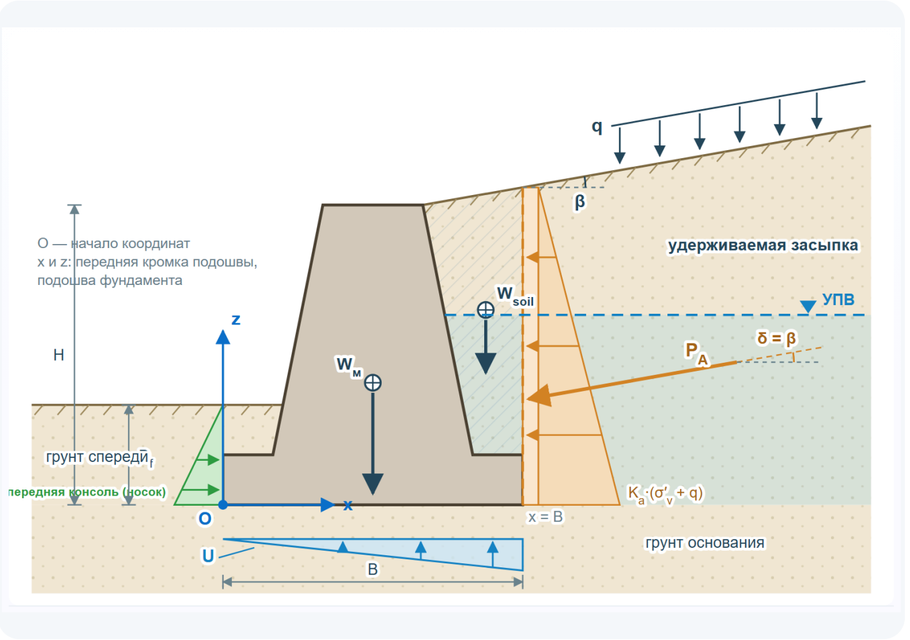
Массивная подпорная стена сопротивляется сдвигу и опрокидыванию **за счёт собственного веса**. Модуль рассматривает каменную или бетонную массивную стену с наклонной трапециевидной лицевой частью и ступенчатыми уступами фундамента с обеих сторон:

$$B = W_{bl} + W_{dl} + W_u + W_{dr} + W_{br}$$

Стена: H — полная высота, W_u — ширина по верху, W_{dl}, W_{dr} — смещения передней и задней граней (уклоны), W_{bl}, W_{br} — вылеты уступов подошвы, H_{fl}, H_{fr} — высоты уступов; удельный вес: для камня 22, для бетона 24 kN/m³.

Грунт: несвязная засыпка (c′ = 0), наклонная поверхность β, пригрузка q, грунтовая вода, а также грунт и вода высотой D_f перед стеной.

Три теории: Rankine, Coulomb (статическая), Mononobe–Okabe (сейсмическая).
Проверки: сдвиг, опрокидывание, эксцентриситет, несущая способность.



Свободное тело, ведомость сил, единое правило знаков

ТЕОРИЯ

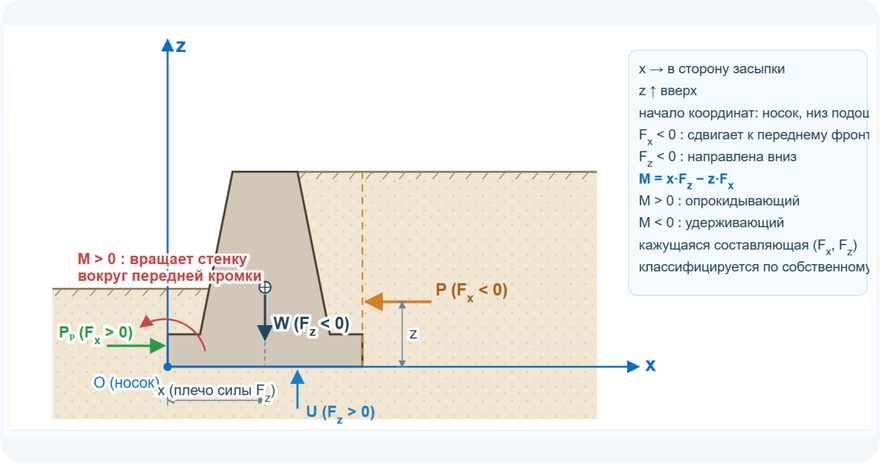
Устойчивость — это задача на **равновесие**: сначала определяется, что находится в равновесии и как задаются знаки сил. Начало координат O находится в **носке** (переднем нижнем углу), x направлена в сторону засыпки, z — вверх. Сила записывается своими составляющими (F_x, F_z) и точкой приложения; момент относительно O:

$$M = x\,F_z - z\,F_x \qquad M > 0:\ \text{опрокидывание}, \qquad M < 0:\ \text{заделка}$$

Для веса ($F_z = -W$, $x > 0$) $M = -xW < 0$: стенка удерживается. Для горизонтального давления, направленного вперёд ($F_x < 0$), $M = -zF_x > 0$: стенка опрокидывается. Противодавление ($F_z > 0$) опрокидывает стенку, сопротивление спереди ($F_x > 0$) её удерживает.

Ни одна сила заранее не относится к «удерживающим»; каждая составляющая учитывается со своим знаком (вертикальная составляющая наклонного давления обоснованно является удерживающей).

Свободное тело = стена + грунт, перемещающийся вместе с ней; каждая позиция **ведомости сил** читается одинаково во всех трёх проверках: ни одна сила не может быть пропущена в одной проверке и учтена в другой.



Разбиение на части, центры тяжести и плечи

ТЕОРИЯ

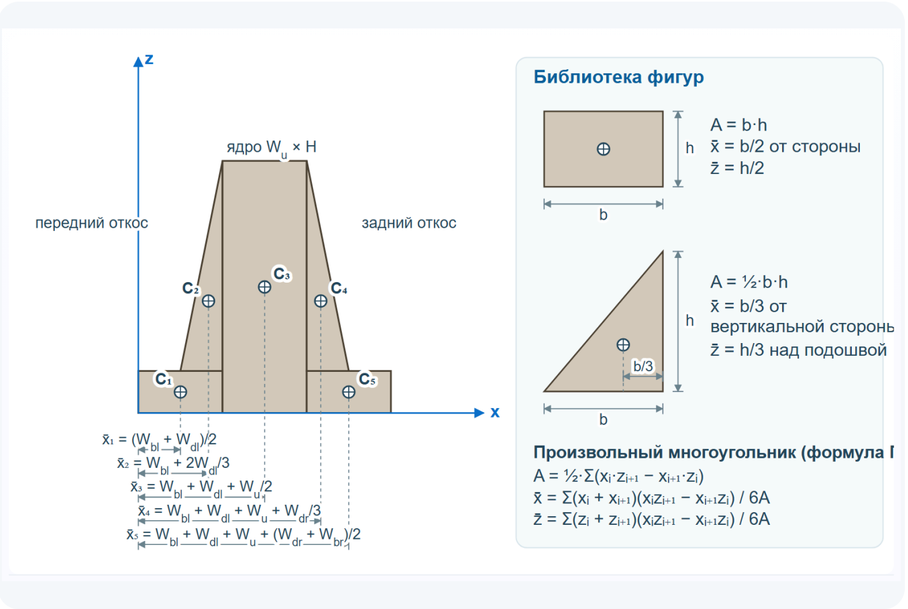
Вес стены и его момент относительно носка также служат основой обеих проверок устойчивости. Поперечное сечение разбивается на простые фигуры с известными площадью и центром тяжести (носок, передний откос, ядро, задний откос, пятка):

$$W_i = \gamma_m A_i \qquad W_m = \sum W_i \qquad \bar{x}_m = \frac{\sum W_i\,\bar{x}_i}{W_m} \qquad \bar{z}_m = \frac{\sum W_i\,\bar{z}_i}{W_m}$$

В ведомости сил стена — одна позиция: $F_z = -W_m$ в точке $\bar{x}_m$; её момент $M = -W_m\bar{x}_m = -\Sigma M_i$.

Высота $\bar{z}_m$ необходима только для горизонтальной силы инерции $k_h W_m$ (землетрясение).

Модуль дополнительно рассчитывает всё сечение как единый многоугольник; результаты совпадают с точностью до 10^{-9}.



Условие

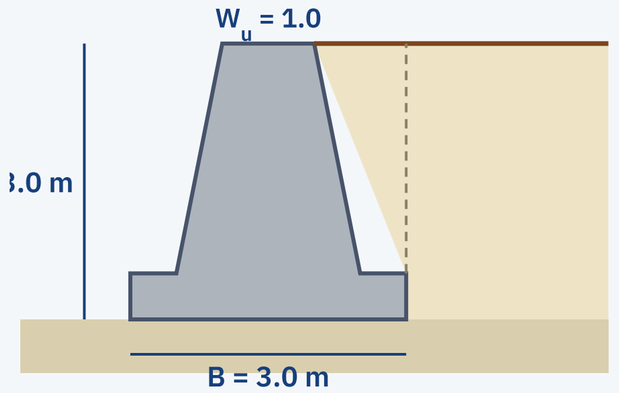
ПРИМЕР

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Площадь и вес пяти частей; $\mathbf{W_m}$, $\mathbf{\bar{x}_m}$, $\mathbf{\bar{z}_m}$.

Дано

Сечение	$H = 3.0$ **m;** $W_u = 1.0$ **m;** $W_{dl} = W_{dr} = 0.5$ **m;** $W_{bl} = W_{br} = 0.5$ **m;** $H_{fl} = H_{fr} = 0.5$ **m (B = 3.0 m)**
Материал	**каменная стена:** $\gamma_m = 22$ kN/m^3



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Части (напр., передний откос: A = ½(0.5)(3.0 − 0.5) = 0.625; $\bar{x} = W_{bl} + 2W_{dl}/3 = 0.833$; $\bar{z} = H_{fl} + (H - H_{fl})/3 = 1.333$)

Часть	A (m²)	$\bar{x}$ (m)	$\bar{z}$ (m)	W = 22A (kN/m)	W·$\bar{x}$	W·$\bar{z}$
Носок	0.500	0.500	0.250	11.00	5.50	2.75
Передний откос	0.625	0.833	1.333	13.75	11.46	18.33
Тело (ядро)	3.000	1.500	1.500	66.00	99.00	99.00
Задний откос	0.625	2.167	1.333	13.75	29.79	18.33
Пятка	0.500	2.500	0.250	11.00	27.50	2.75
Итого	**5.250**			**115.50**	**173.25**	**141.17**

2 Центр тяжести стены

$$\bar{x}_m = \frac{173.25}{115.50} = \mathbf{1.500}\ \text{m} \qquad \bar{z}_m = \frac{141.17}{115.50} = \mathbf{1.222}\ \text{m}$$

Вес стены **W_m = 115.50 kN/m**, $\bar{x}_m$ = 1.50 m от носка, $\bar{z}_m$ = 1.22 m от подошвы; его момент M = −173.25 kN·m/m (удерживающий).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Вертикальная плоскость давления и блок грунта

ТЕОРИЯ

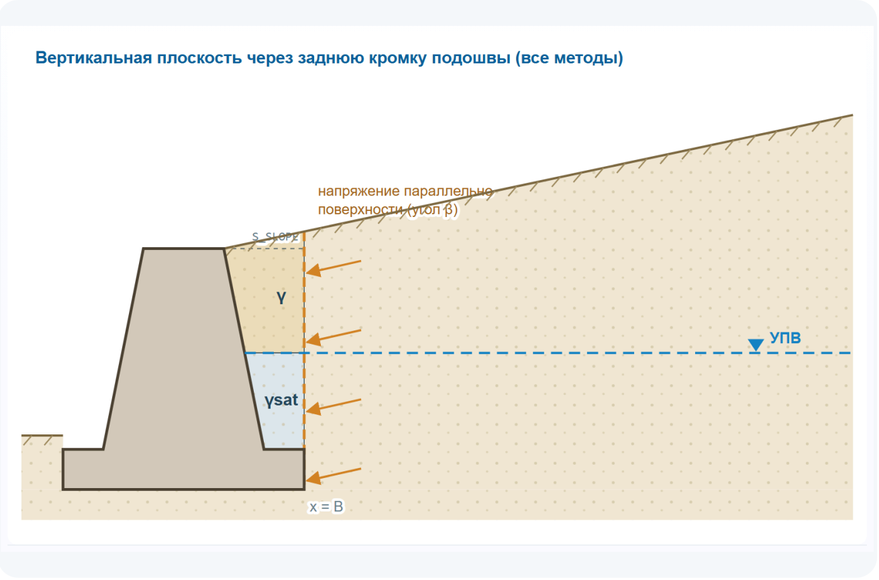
Почему давление грунта действует на **заднюю кромку подошвы**, а не на тыльную наклонную грань стены? Грунт над задней консолью не может сдвигаться относительно стены: при перемещении стены он перемещается вместе с ней. Плоскости разрушения в засыпке начинаются не от тыльной грани, а **от задней кромки пятки**. Согласованное свободное тело: стена + этот грунтовый блок; **внешняя плоскость давления** на его внешней грани вертикальна при x = B:

Плоскость идёт от поверхности над задним краем вниз, до уровня ниже подошвы; в наклонной засыпке она охватывает и подъём поверхности. Всё, что находится между плоскостью и тыловой гранью стены, является **весом**; плоскость — это грунт по грунту: трение по стенке не учитывается, а равнодействующая давления действует под углом δ = β.

Спереди засыпка над носком также перемещается вместе со стеной: вертикальная нагрузка W_{toe}; ввод $D_f = 0$ означает, что передний грунт может быть учтён.

Вертикальная часть **пригрузки** над пяткой (Q_{heel}) — благоприятная нагрузка, но, поскольку она считается нагрузкой, которая может как присутствовать, так и отсутствовать, она **не входит ни в одну проверку**; её боковое действие, напротив, учитывается всегда.

Расчёт ведётся по полным напряжениям: грунт ниже уровня воды взвешивается с γ_{sat}, а сама вода добавляется отдельной силой (U_{rear}, противодавление); γ′ и противодавление вместе не принимаются.



Условие

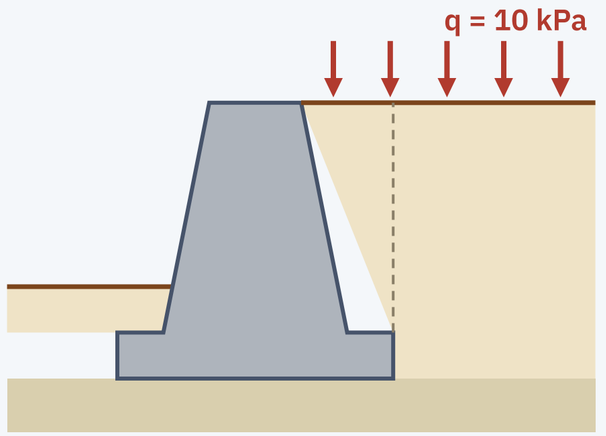
ПРИМЕР

Дано

Стена	**Сечение из примера 1; высота грунта перед стеной $D_f = 1.0$ m**
Грунт	**сухая засыпка: $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$; горизонтальная поверхность**
Пригрузка	$q = 10$ **kPa (на поверхности)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Вес и положение **грунтового блока**, перемещающегося вместе со стеной; **засыпка спереди**; почему Q_{heel} не входит в проверки?



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Прямоугольник над задней консолью (пяткой) + треугольник рядом с задним откосом (до плоскости x = B = 3.0)

$$A_r = W_{br}(H - H_{fr}) = 0.5(2.5) = 1.250\ \text{m}^2\ (\bar{x} = 2.75,\ \bar{z} = 1.75)$$

$$A_t = \tfrac{1}{2} W_{dr}(H - H_{fr}) = 0.625\ \text{m}^2\ (\bar{x} = 2.333,\ \bar{z} = 2.167)$$

$$W_s = \gamma(A_r + A_t) = 18(1.875) = \mathbf{33.75}\ \text{kN/m}$$

2 Расположение

$$\bar{x}_s = \frac{1.250(2.75) + 0.625(2.333)}{1.875} = \mathbf{2.611}\ \text{m} \qquad \bar{z}_s = \mathbf{1.889}\ \text{m}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Передняя засыпка (над носком, D_f = 1.0 m) и пригрузка

$$A_{toe} = \tfrac{1}{2}(0.5 + 0.60)(0.5) = 0.275 \text{ m}^2 \quad W_{toe} = 18(0.275) = \mathbf{4.95} \text{ kN/m } (\bar{x} = 0.276)$$

$$Q_{heel} = q(B - x_{BT}) = 10(3 - 2) = \mathbf{10.0} \text{ kN/m (не входит ни в одну проверку)}$$

Суммарная вертикальная нагрузка N = W_m + W_s + W_{toe} = 115.50 + 33.75 + 4.95 = **154.20 kN/m**. Q_{heel} = 10.00 kN/m — «неиспользуемая» позиция ведомости.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Rankine и Coulomb, на вертикальной плоскости

ТЕОРИЯ

Если поверхность засыпки наклонена под углом β, то в решении Rankine для полубесконечного откоса напряжение на вертикальной плоскости **параллельно поверхности**: $\sigma'_a = K_{a\beta}\sigma'_v$:

$$K_{a\beta} = \cos\beta\,\frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}} \qquad K_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'}\ (\beta = 0)$$

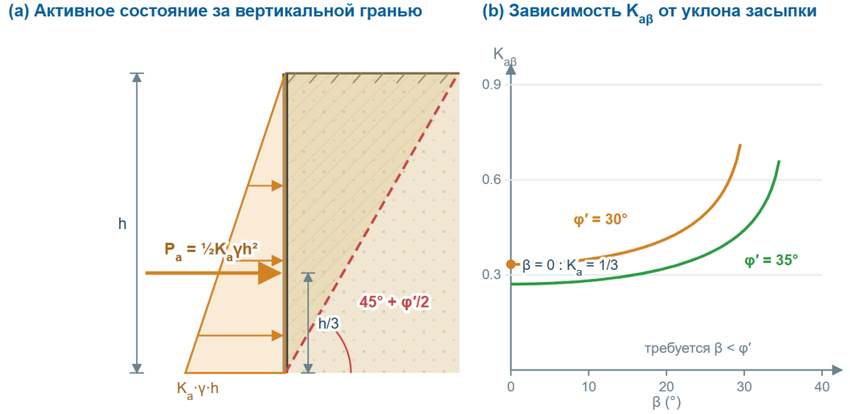
$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2\ \ (h/3) \qquad P_Q = K_a q h\ \ (h/2)$$

Для извлечения корня необходимо β < φ′; при β ≥ φ′ сам откос неустойчив, и расчёт блокируется.

Coulomb: для вертикальной плоскости (α = 90°) и δ = β значение K_a равно $K_{a\beta}$ по Rankine **точно при любом β**; на этой плоскости оба метода дают одно и то же давление. h — высота плоскости (с учётом повышения поверхности).

Горизонтальная составляющая P cos β, вертикальная составляющая P sin β (на восходящем откосе направлена вниз: удерживающая).

Пригрузка рассчитывается дважды (с q и без q); P_Q — разность.



Условие

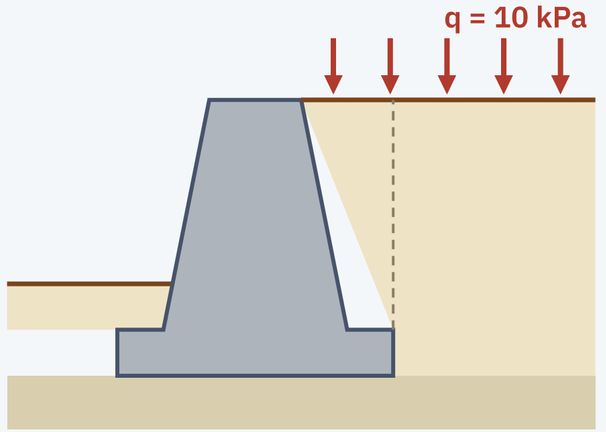
ПРИМЕР

Дано

Стена и грунт	**Стена и засыпка из примера 2:** $h = H = 3.0$ **m;** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30^\circ$**; горизонтальная поверхность**
Пригрузка	$q = 10$ **kPa**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

K_a, равнодействующая давления грунта P_A и давления от пригрузки P_Q и их моменты.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 K_a = (1 − sin30°)/(1 + sin30°) = 0.3333; распорные усилия (в вертикальной плоскости, горизонтальные)

$$P_A = \tfrac{1}{2} K_a \gamma h^2 = \tfrac{1}{2}(0.3333)(18)(9) = \mathbf{27.00}\ \text{kN/m} \quad (z = 1.00\ \text{m})$$

$$P_Q = K_a q h = 0.3333(10)(3) = \mathbf{10.00}\ \text{kN/m} \quad (z = 1.50\ \text{m})$$

2 Суммарный горизонтальный распор и опрокидывающий момент (относительно носка)

$$\Sigma H_{drive} = 27.0 + 10.0 = \mathbf{37.0}\ \text{kN/m}$$

$$M_o = 27.0(1.00) + 10.0(1.50) = 27.0 + 15.0 = \mathbf{42.0}\ \text{kN·m/m}$$

Распор от грунта 27.00, распор от пригрузки 10.00 kN/m: в сумме **37.00 kN/m**, момент относительно носка **42.00 kN·m/m**.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

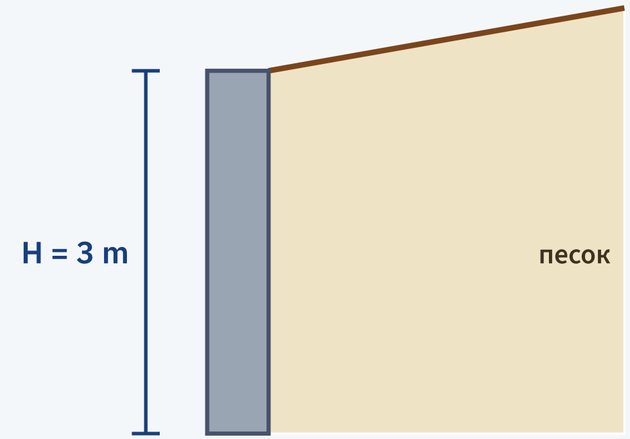
ПРИМЕР

Дано

Стена и грунт	**Стена из Примера 2; та же засыпка, но поверхность поднимается $\beta = 10^\circ$ (по мере удаления от стены)**
Пригрузка	$q = 10$ **kPa**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

$K_{a\beta}$, составляющие равнодействующей давления; изменение результата по сравнению с горизонтальной засыпкой (сдвиг, опрокидывание, эксцентриситет).



γ = 18 kN/m³, φ′ = 30°, β = 10°

Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Коэффициент $K_{a\beta}$ ($\cos\beta = 0.9848$, $\sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'} = 0.4689$)

$$K_{a\beta} = \cos\beta\,\frac{\cos\beta - r}{\cos\beta + r} = 0.9848\,\frac{0.5159}{1.4537} = \mathbf{0.3495} \;\; (\text{по горизонтали } 0.3333)$$

2 Сдвигающие силы (h = высота плоскости = H + подъём поверхности; расчётное ядро)

$$P_A:\; F_x = 31.25,\; F_z = 5.51 \text{ kN/m} \;\; (\text{по горизонтали и вертикали})$$

$$P_Q:\; F_x = 10.93,\; F_z = 1.93 \text{ kN/m}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Проверки (расчётное ядро)

$$\Sigma F_z = -N = -163.23 \text{ kN/m} \quad (\text{блок грунта } 35.34)$$

$$FS_s = 2.412 \qquad FS_o = 5.734 \qquad e = 0.037 \text{ m} \qquad q_{max} = 58.4 \text{ kPa}$$

Восходящий откос увеличивает распор ($K_{a\beta}$ 0.333 → 0.350), но **вертикальная составляющая распора** и более тяжёлый блок грунта действуют удерживающе: FS по сдвигу 2.62 → 2.41, FS по опрокидыванию 6.26 → 5.73; эксцентриситет 0.068 → 0.037 m.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Комбинированный коэффициент между давлением покоя и пассивным

ТЕОРИЯ

Грунт перед стеной (c′ = 0) задаётся **смесью** коэффициентов пассивного давления Rankine и давления покоя Jaky; поскольку полное пассивное сопротивление требует такого перемещения, какого работающая стена не допустит:

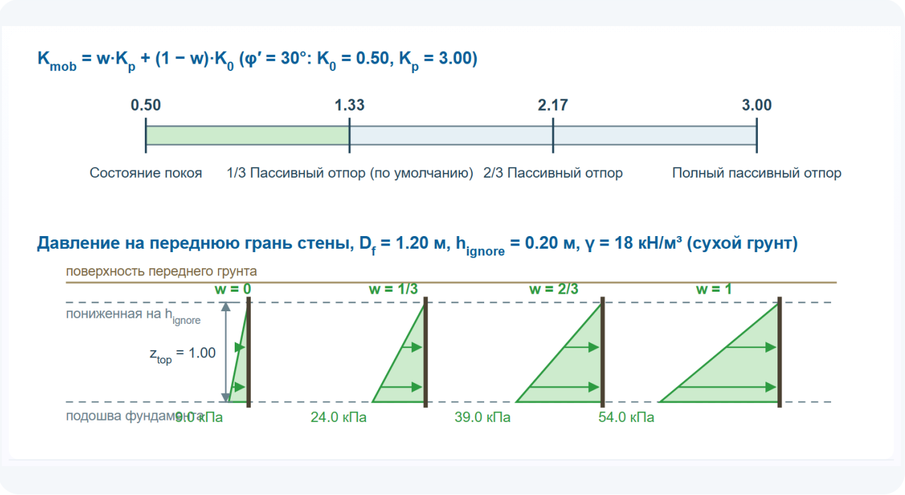
$$K_{mob} = w\,K_p + (1 - w)\,K_0 \qquad K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi'/2) \qquad K_0 = 1 - \sin\varphi'$$

$$p(z) = K_{mob}\,\sigma'_v(z) \qquad P_P = \tfrac{1}{2}K_{mob}\gamma D_f^2\ \ (D_f/3)$$

w = 0 — полный покой, 1/3 (по умолчанию), 2/3, 1 — полное пассивное давление. Верхний слой грунта перед стеной толщиной **h_{ignore}** (может быть вынут, может размягчиться) в расчёт не принимается.

Передний отпор учитывается **только при сдвиге** (в статическом случае полностью, при землетрясении — с $\eta_{p,E}$); **при опрокидывании и расчёте несущей способности он не используется вовсе**.

Распор от воды спереди (h_{wf}) направлен назад и уменьшает результирующий распор.



Условие

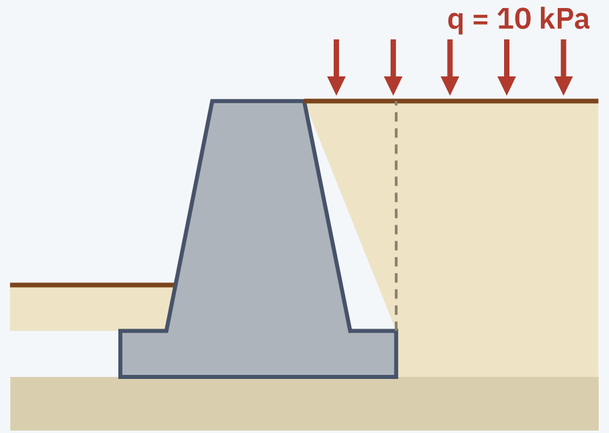
ПРИМЕР

Дано

Грунт перед стенкой	$D_f = 1.0$ **m;** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30^\circ$**;** $h_{ignore} = 0$
Случаи	**полное давление покоя, 1/3, 2/3, полное пассивное давление; и случай, когда сопротивление грунта впереди не учитывается вообще**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

K_{mob}, **P_P** и коэффициент запаса на сдвиг FS_S (для стены из Примера 2).



Решение

РЕШЕНИЕ

1 K_{mob} и сила давления (по умолчанию w = 1/3)

$$K_{mob} = \tfrac{1}{3}(3.000) + \tfrac{2}{3}(0.500) = \mathbf{1.333}$$

$$P_P = \tfrac{1}{2} K_{mob} \gamma D_f^2 = \tfrac{1}{2}(1.333)(18)(1)^2 = \mathbf{12.0}\ \text{kN/m} \quad (z = D_f/3 = 0.333\ \text{m})$$

2 Четыре случая ($FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H_{drive} = (84.81 + P_P)/37.0$)

Состояние	w	K_{mob}	P_P (kN/m)	FS_s
Полное состояние покоя	0	0.500	4.50	2.414
1/3 пассивного давления + 2/3 давления покоя (по умолчанию)	1/3	1.333	12.00	2.616
2/3 пассивного давления + 1/3 давления покоя	2/3	2.167	19.50	2.819
Полное пассивное давление	1	3.000	27.00	3.022
Сопротивление под нижним концом не учитывается	–	–	0	2.292

Учёт сопротивления переднего грунта изменяет FS_s от 2.29 до 3.02 (по умолчанию **2.62**); если передний грунт может быть удалён, учёт обнуляется: D_f и h_{ignore} следует выбирать осознанно.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Три проверки по одной ведомости сил

ТЕОРИЯ

Сдвиг по подошве: подошва удерживается трением; требуемая сдвигающая сила ΣH_{drive} − ΣP_{resist}, располагаемая сдвигающая сила $\mu_b N$ (сцепления нет; N — эффективная нормальная сила, с учётом противодавления). Сопротивление суммируется в знаменателе:

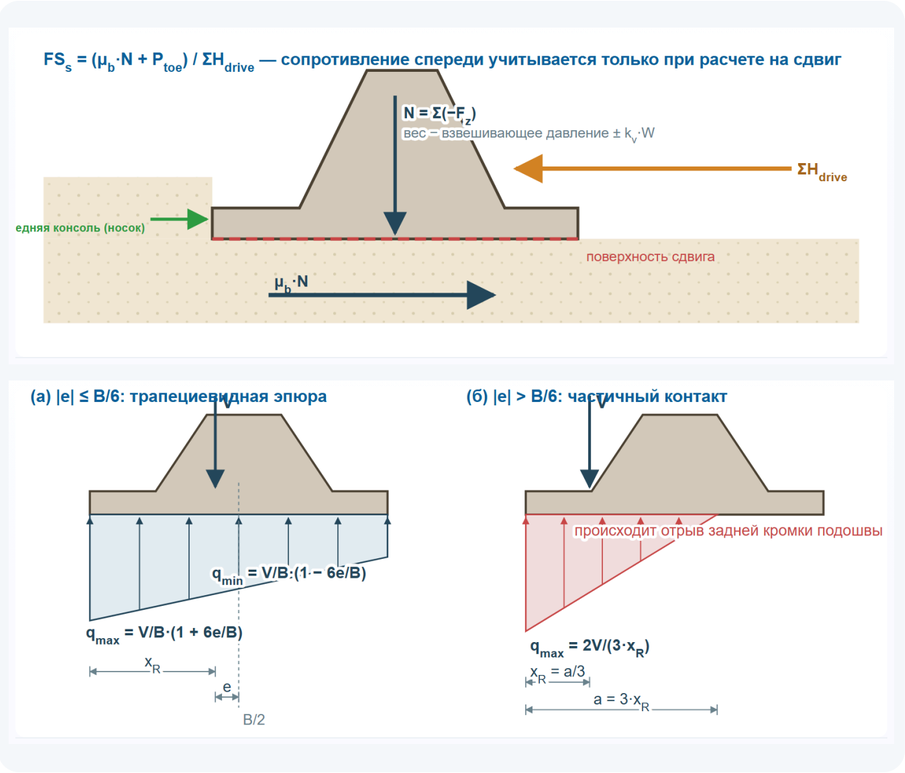
$$FS_s = \frac{\mu_b N + P_{toe}}{\Sigma H_{drive}} \qquad \mu_b = \tan \delta_b$$

Опрокидывание происходит относительно носка: составляющие $-zF_x$ и xF_z каждого элемента входят в $\Sigma M_{overturning}$ или $\Sigma M_{resisting}$ в зависимости от своего знака; сопротивление грунта спереди не учитывается:

$$FS_o = \frac{\Sigma M_{res}}{\Sigma M_{ov}} \qquad x_R = -\frac{\Sigma M}{V} \qquad e = \frac{B}{2} - x_R$$

Несущая способность: при |e| ≤ B/6 подошва контактирует с грунтом полностью; в противном случае грунт не воспринимает растяжение, и контактирует лишь часть подошвы:

$$q_{max,min} = \frac{V}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \qquad |e| > \frac{B}{6}: \quad q_{max} = \frac{2V}{3x_R}$$



Условие

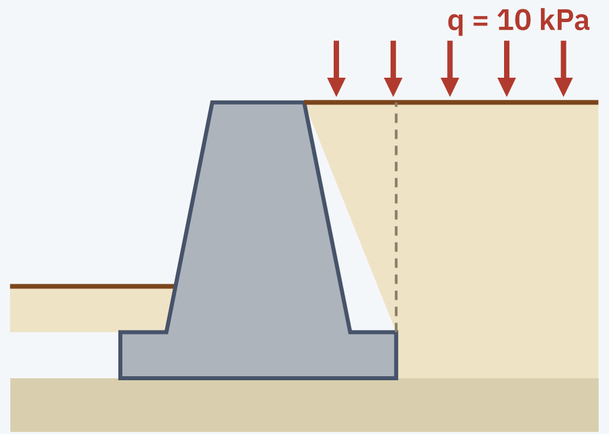
ПРИМЕР

Дано

Стена и нагрузки	**Стена из примеров 1–5:** $B = 3.0$ **m;** $W_m = 115.5,\ W_s = 33.75,\ W_{toe} = 4.95$ kN/m**;** $P_A = 27.0,\ P_Q = 10.0$ kN/m
Сопротивление	$\mu_b = 0.55$**; сопротивление перед стенкой** $P_P = 12.0$ **kN/m (w = 1/3);** $q_{all} = 200$ **kPa**
Требуемый	$FS_s \geq 1.5,\ \ FS_o \geq 2.0$**; подошва должна полностью прилегать к грунту**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

FS_s, FS_o, x_R, e, q_{max}, q_{min} и результат каждой проверки.



Решение (1/3)

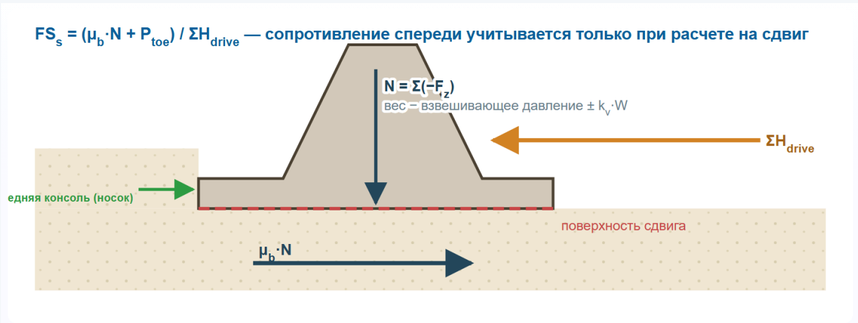
РЕШЕНИЕ

1 Трение по подошве: N = W_m + W_s + W_{toe} (без Q_{heel})

$$N = 115.50 + 33.75 + 4.95 = \mathbf{154.20}\ \text{kN/m}$$

$$\mu_b N = 0.55(154.20) = 84.81\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{84.81 + 12.0}{37.0} = \mathbf{2.616}\ \geq 1.5\ \checkmark$$



Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

2 Опрокидывающий момент (относительно носка; только силы давления)

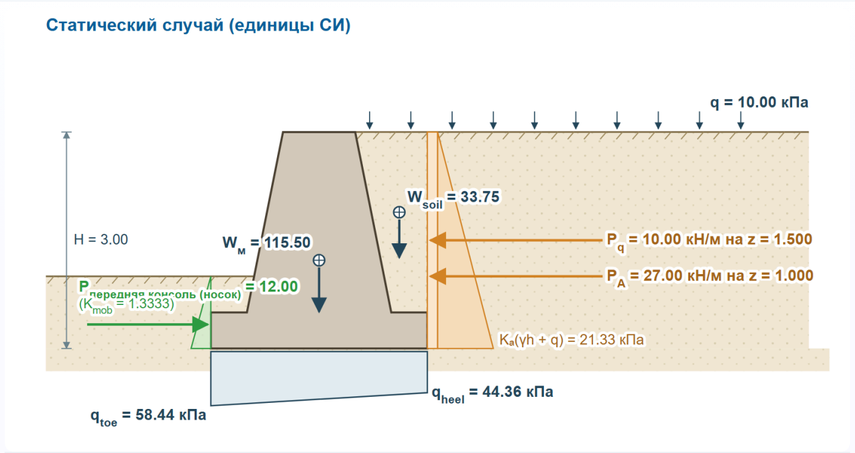
$$M_o = P_A(1.00) + P_Q(1.50) = 27.0 + 15.0 = \mathbf{42.0}\ \text{kN·m/m}$$

3 Удерживающий момент: стена + блок грунта + засыпка перед стеной

$$M_r = W_m\bar{x}_m + W_s\bar{x}_s + W_{toe}\bar{x}_{toe}$$

$$= 173.25 + 88.13 + 1.36 = \mathbf{262.74}$$

$$FS_o = \frac{262.74}{42.0} = \mathbf{6.256}\ \geq 2.0\ \checkmark$$



Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

4 Положение равнодействующей и эксцентриситет

$$\Sigma M = M_o - M_r = 42.00 - 262.74 = -220.74$$

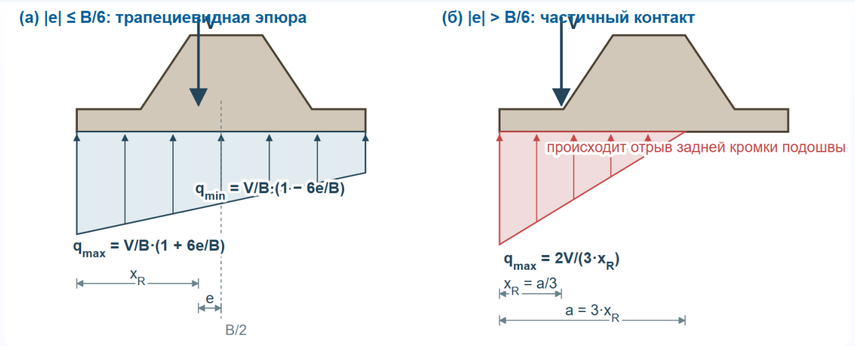
$$x_R = -\frac{\Sigma M}{V} = \frac{220.74}{154.2} = \mathbf{1.4315}\ \text{m}$$

$$e = \frac{B}{2} - x_R = \mathbf{0.0685}\ \text{m} \le \frac{B}{6} = 0.500\ \checkmark$$

5 Напряжения по подошве (полный контакт)

$$q_{max} = \frac{154.2}{3}\left(1 + \frac{6(0.0685)}{3}\right) = \mathbf{58.44}\ \text{kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{44.36}\ \text{kPa}$$



FS_s = **2.62**, FS_o = **6.26**, e = 0.068 m, q_{max} = **58.4 kPa** ≤ 200, q_{min} = 44.4 kPa > 0: **в статическом случае все проверки выполняются**.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Гидростатическое давление воды с обеих сторон, линейное противодавление на подошву

ТЕОРИЯ

Давление воды изотропно и действует перпендикулярно каждой поверхности, с которой соприкасается. Свободное тело ограничено водой с трёх сторон: плоскость тылового давления, лицевая грань стены и нижняя грань фундаментной плиты. Каждое из них — отдельная позиция в ведомости сил:

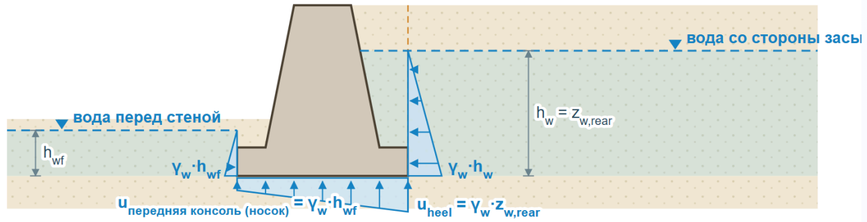
$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_w^2 \;\; (h_w/3) \qquad U_{front} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_{wf}^2 \;\; (h_{wf}/3,\ \text{назад})$$

Поровое давление под подошвой изменяется **линейно** от напора у носка до напора у пятки (линейная потеря напора):

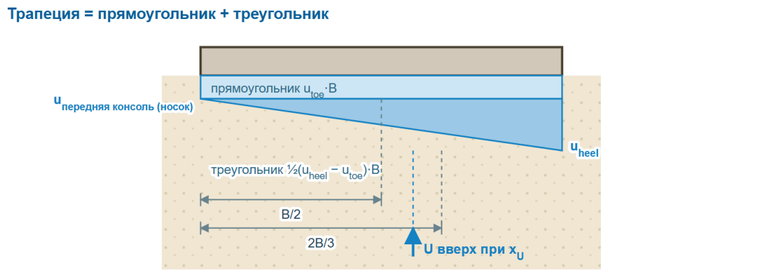
$$U = \frac{B\,(u_{toe} + u_{heel})}{2} \qquad x_U = \frac{B\,(u_{toe} + 2u_{heel})}{3\,(u_{toe} + u_{heel})}$$

Противодавление направлено вверх (F_z = +U): оно уменьшает N и, следовательно, трение по подошве, и добавляет опрокидывающий момент $U \cdot x_U$.

$h_W = H - z_W$ (z_W — глубина УГВ от верха стенки); высота воды спереди h_{wf} действует в сторону тыла и уменьшает результирующее давление. Если уровни воды различаются, следует отдельно рассмотреть гидравлическую устойчивость (фильтрацию).



U = B·(u_toe + u_heel)/2 при x = B·(u_toe + 2u_heel) / (3(u_toe + u_heel))



Условие

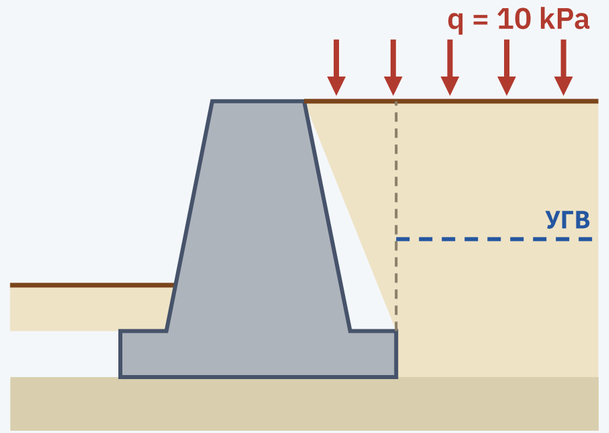
ПРИМЕР

Дано

Стена и грунт	**Стена и засыпка из примеров 1–5 ($\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 20$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$, $q = 10$ kPa); статический случай**
Вода	**в засыпке уровень грунтовых вод находится на 1.5 m ниже верха стены ($h_w = 1.5$ m); перед стеной воды нет; под подошвой — линейное противодавление**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Изменение равнодействующей давления грунта и воды; **противодавление** и **N**; FS_s, FS_o, e, q_{max}.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Сила давления грунта (γ вверху, γ′ = 20 − 9.81 = 10.19 внизу) и сила давления воды

$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma d_1^2 + K_a\gamma d_1 d_2 + \tfrac{1}{2}K_a\gamma' d_2^2$$

$$= 6.75 + 13.50 + 3.82 = \mathbf{24.07}\ \text{kN/m}\ \ (z = 1.061\ \text{m})$$

$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}(9.81)(1.5)^2 = \mathbf{11.04}\ \text{kN/m}\ \ (z = 0.50\ \text{m}) \qquad P_Q = 10.0$$

2 Противодавление (у носка u = 0, у пятки u = 9.81·1.5 = 14.72 kPa; треугольная эпюра)

$$U = \tfrac{1}{2}(14.72)(3.0) = \mathbf{22.07}\ \text{kN/m (вверх)}\ \ \text{at}\ x_U = \tfrac{2B}{3} = 2.00\ \text{m}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Эффективная нормальная сила и трение (для блока грунта принят γ_{sat}: W_s = 34.95)

$$N = W_m + W_s + W_{toe} - U = 115.50 + 34.95 + 4.95 - 22.07 = \mathbf{133.33}\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{0.55(133.33) + 12.0}{24.07 + 10.0 + 11.04} = \frac{85.33}{45.11} = \mathbf{1.892}$$

4 Опрокидывание и подошва

$$M_o = 25.54 + 15.00 + 5.52 + 44.14 = 90.20\ \ (P_A,\ P_Q,\ U_{rear},\ \text{подъём}) \qquad M_r = 265.98$$

$$FS_o = \frac{265.98}{90.20} = \mathbf{2.949} \qquad x_R = \frac{175.78}{133.33} = 1.318\ \text{m} \quad e = 0.182\ \text{m}$$

$$q_{max} = \mathbf{60.58} \qquad q_{min} = \mathbf{28.30}\ \text{kPa}$$

Вода снизила FS_s с 2.62 до **1.89**, FS_o — с 6.26 до **2.95**, а q_{min} — с 44.4 до 28.3 kPa (противодавление уменьшило N на 22.1 kN/m и добавило 44.1 kN·m/m опрокидывающего момента); проверки по-прежнему выполняются.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Распор Mononobe–Okabe и инерция стены

ТЕОРИЯ

В псевдостатическом методе на каждую массу действуют горизонтальная сила $k_h mg$ и вертикальная сила $\pm k_v mg$; критическим является направление, при котором инерция толкает вперёд (в ту же сторону, что и распор). Сила тяжести и инерция вместе подобны полю тяжести, повёрнутому на угол θ; призма Coulomb рассчитывается с учётом сил инерции (Mononobe–Okabe). В вертикальной плоскости, при горизонтальной засыпке (δ = β = 0):

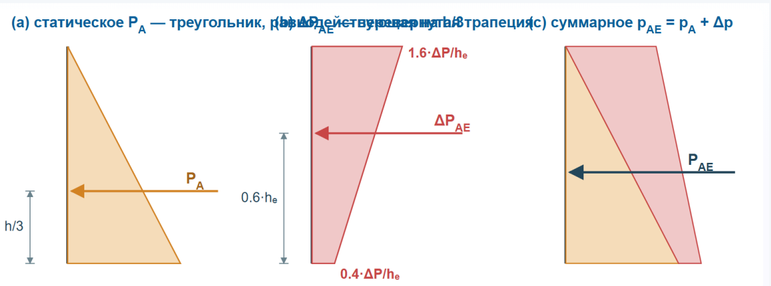
$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi' - \theta)}{\cos^2\theta\left[1+\sqrt{\dfrac{\sin\varphi'\sin(\varphi'-\theta)}{\cos\theta}}\right]^2} \qquad P_{AE} = \left(\tfrac{1}{2}\gamma h^2 + qh\right) K_{AE}$$

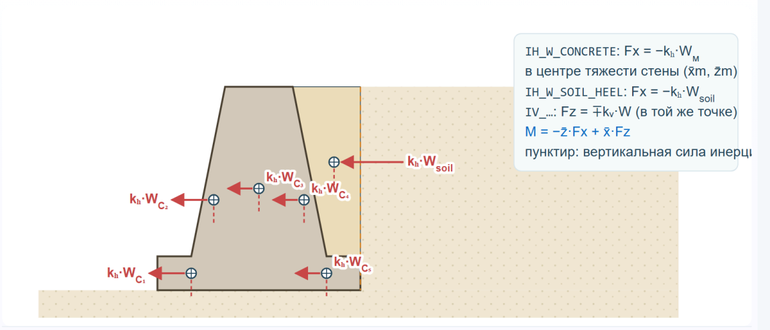
Если $\varphi' - \theta < 0$, ни одна призма не может находиться в равновесии: «решения нет», проверки считаются невыполненными.

Распределение: P_{AE} задаёт величину, но не положение. $\Delta P_{AE} = P_{AE} - P_{A,static}$ принимается в виде перевёрнутой трапеции (вверху 1.6ΔP/h, внизу 0.4ΔP/h; равнодействующая на **0.6h**); статическая часть сохраняет свою статическую форму.

Инерция: стена, массив грунта и засыпка спереди смещаются вперёд силой $k_h W$, приложенной в центре тяжести; при $k_v > 0$ рассматриваются оба случая с $(1 \pm k_v)$, определяющим является наименьший FS. Добавляется гидродинамическое давление воды $(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$ (на высоте $0.4h_w$).

Пассивное сопротивление перед стеной при землетрясении умножается на $\eta_{p,E}$; по умолчанию **0** (не учитывается).





Условие

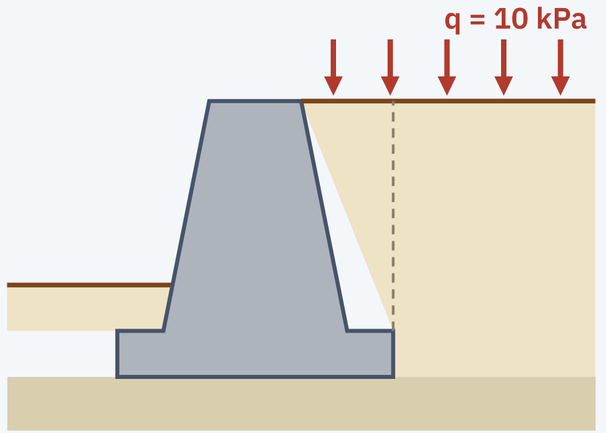
ПРИМЕР

Дано

Стена и грунт	**Стена и засыпка из примеров 1–6 (статические FS_s = 2.62; FS_o = 6.26)**
Землетрясение	$k_h = 0.15$, $k_v = 0$; **учёт сопротивления перед стенкой** $\eta_{p,E} = 0$; **требуется** $FS_s,\ FS_o \geq 1.1$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

θ, $\mathbf{K_{AE}}$, $\mathbf{P_{AE}}$, $\mathbf{\Delta P_{AE}}$, $\bar{z}$; силы инерции; FS_s, FS_o, e, q_{max}.



Решение (1/3)

РЕШЕНИЕ

1 Сейсмический угол и коэффициент

$$\theta = \tan^{-1} 0.15 = 8.53^\circ$$

$$\sqrt{\sin 30^\circ \sin(30^\circ - 8.53^\circ)/\cos 8.53^\circ} = 0.4302$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(21.47^\circ)}{\cos^2 8.53^\circ\,(1+0.4302)^2} = \mathbf{0.4329}$$

2 Динамический распор и сейсмическое приращение (статический $P_A + P_Q$ = 37.0 kN/m)

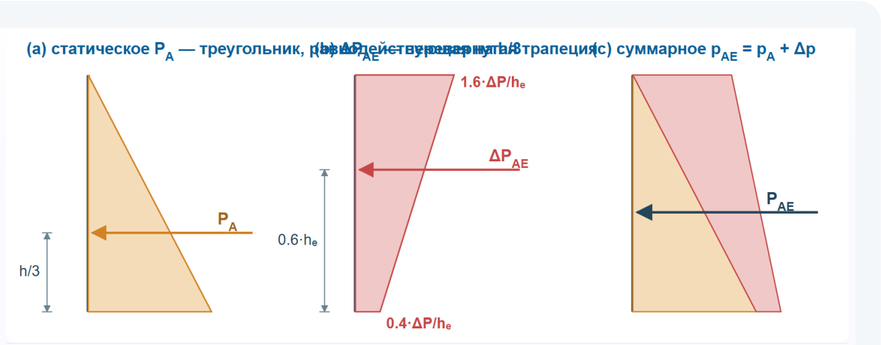
$$P_{AE} = (81+30)(0.4329) = \mathbf{48.06}\ \text{kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 48.06 - 37.0 = \mathbf{11.06}\ \text{kN/m}\ \ (0.6h)$$

3 Высота приложения нагрузки

$$\bar{z}_{AE} = [27.0(1.00) + 10.0(1.50) + 11.06(1.80)]/48.06$$

$$= 61.90/48.06 = \mathbf{1.288}\ \text{m}$$



Решение (2/3)

РЕШЕНИЕ

4 Инерционные силы $k_h W$ (в центрах тяжести, направлены вперёд)

$$IH_m = 0.15(115.50) = 17.325 \quad (z = 1.222\ \text{m})$$

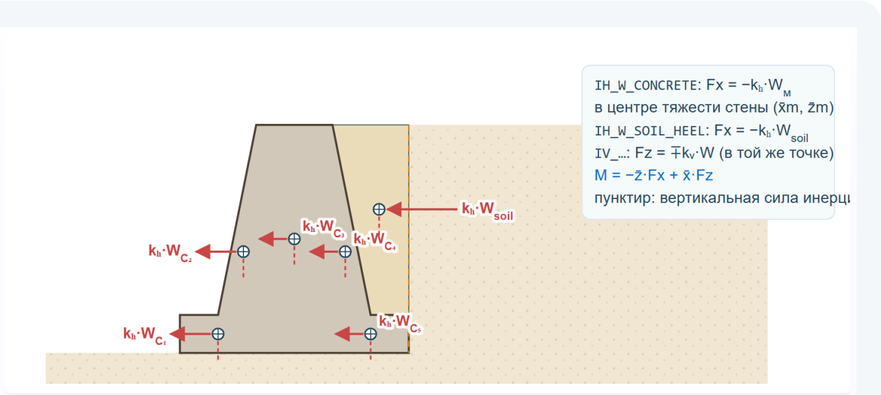
$$IH_s = 0.15(33.75) = 5.062 \quad (z = 1.889\ \text{m})$$

$$IH_{toe} = 0.15(4.95) = 0.743 \quad (z = 0.758\ \text{m})$$

5 Сдвиг (сопротивление грунта перед стеной не учитывается)

$$\Sigma H_{drive} = 48.06 + 17.32 + 5.06 + 0.74 = 71.19$$

$$FS_{s,E} = \frac{\mu_b N}{\Sigma H_{drive}} = \frac{84.81}{71.19} = \mathbf{1.191} \ \geq 1.1 \ \checkmark$$



Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

6 Опрокидывание и положение равнодействующей

$$M_{o,E} = P_{AE}\bar{z} + \Sigma IH\, z = 61.90 + 21.18 + 9.56 + 0.56 = 93.20$$

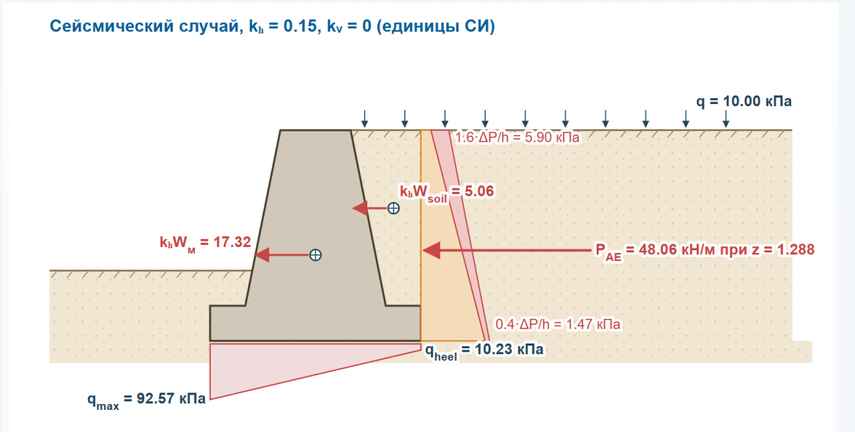
$$FS_{o,E} = \frac{262.74}{93.20} = \mathbf{2.819} \;\geq 1.1$$

$$x_R = \frac{262.74 - 93.20}{154.2} = 1.099 \text{ m} \qquad e = \mathbf{0.401} \text{ m}$$

7 Напряжения по подошве (|e| = 0.401 m ≤ B/6 = 0.50 m: полный контакт)

$$q_{max} = \frac{154.2}{3}\left(1 + \frac{6(0.401)}{3}\right) = \mathbf{92.57} \text{ kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{10.23} \text{ kPa}$$



При землетрясении FS_s = **1.19**, FS_o = **2.82**, e = **0.401 m**, q_{max} = **92.6 kPa**; землетрясение изменило FS_s с 2.62 до 1.19, а e — с 0.068 до 0.401 m: определяющими проверками являются **сдвиг** и **эксцентриситет**.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Где заканчиваются проверки

ТЕОРИЯ

Эти проверки рассматривают стену на её фундаменте как **единый жёсткий блок**: это **внешняя устойчивость** стены. Гравитационная подпорная стена из камня или массивного бетона может разрушиться и **внутри** самой себя (особенно при большой высоте или малой толщине сечения, в сухой кладке, при слабом растворе и при землетрясении); эти проверки выполняются по усилиям (воздействиям), выдаваемым данным модулем.

Несвязная засыпка ($c' = 0$); засыпка из двух грунтов или слоистая в этом модуле не предусмотрена. Поверхность засыпки горизонтальная или имеет один уклон.

Трение по подошве $\mu_b = \tan \delta_b$ (для каменной кладки/бетона обычно от $2/3\varphi'$ до φ'); адгезия не учитывается. Полное пассивное сопротивление впереди стены добавляется к доле сопротивления трению и не используется при проверках на опрокидывание и несущую способность.

Расчёт выполняется на 1.00 m длины стены; боковые давления от полосовой и сосредоточенной пригрузки добавляются по Boussinesq (жёсткая стена).

Сдвигающие воздействия (гидравлическая устойчивость, фильтрация, общая устойчивость, осадка) не входят в рамки данного модуля.

Резюме

Главное

Свободное тело = стена + грунт, перемещающийся вместе с ней; давление действует **на вертикальной плоскости по заднему краю фундаментной плиты** ($\delta = \beta$); единое правило знаков: $M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$, опрокидывание считается положительным

Вес: $W_i = \gamma_m A_i$, $\bar{x} = \Sigma W_i \bar{x}_i / \Sigma W_i$; грунтовый блок и передняя засыпка также перемещаются вместе со стеной; пригрузка на задней консоли (Q_{heel}) ни в одну проверку не входит

Активное: $P_A = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2$ (h/3), $P_Q = K_a q h$ (h/2); для наклонной засыпки $K_{a\beta}$ (Rankine на вертикальной плоскости = Coulomb); **пассивное**: $K_{mob} = w K_p + (1 - w) K_0$, только при сдвиге

Сдвиг $FS_s = (\mu_b N + P_P) / \Sigma H_{drive}$; **опрокидывание** $FS_o = \Sigma M_{res} / \Sigma M_{ov}$ (относительно носка); **несущая способность**: $x_R = -\Sigma M / V$, $e = B/2 - x_R$, $q = V/B(1 \pm 6e/B)$, при $|e| > B/6$ $q_{max} = 2V/(3x_R)$

Вода: вес с γ_{sat} + U_{rear} отдельной статьёй; противодавление u_{toe} у носка – u_{heel} у пятки, линейное: уменьшает N′ и добавляет опрокидывающий момент

Землетрясение: $\theta = \tan^{-1} k_h/(1 - k_v)$; $P_{AE} = (\frac{1}{2}\gamma h^2 + qh) K_{AE}$; ΔP_{AE} на высоте 0.6h; $k_h W$ — сила инерции; учёт переднего пассивного сопротивления $\eta_{p,E}$ (по умолчанию 0)

Список литературы

Три теории, используемые в модуле, и источник, по которому приведены их замкнутые формулы (Ka, Kp, KAE). Всё, что не выведено из них прямо, является исходной предпосылкой данного модуля и отмечено в тексте.

Coulomb C.A. (1776) Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences 7, Paris.

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

Mononobe N., Matsuo H. (1929) On the determination of earth pressures during earthquakes. Proceedings of the World Engineering Congress, Tokyo, 9:177–185.

Okabe S. (1926) General theory of earth pressure. Journal of the Japanese Society of Civil Engineers 12(1).

Rankine W.J.M. (1857) On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 147:9–27.

ПРИМЕЧАНИЕ

Все численные примеры получены с помощью собственного расчётного ядра модуля; модуль даёт те же значения. Пошаговый пример на странице модуля — также эта стена (H = 3 m, каменная стена, q = 10 kPa, k_h = 0.15).

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

От теории к практике

Ввести в GeoTerva сечение, засыпку, пригрузку, воду и сейсмические коэффициенты собственной стены; модуль одновременно выдаёт ведомость сил, три проверки и напряжения под подошвой.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне
Для пробных модулей регистрация не требуется.