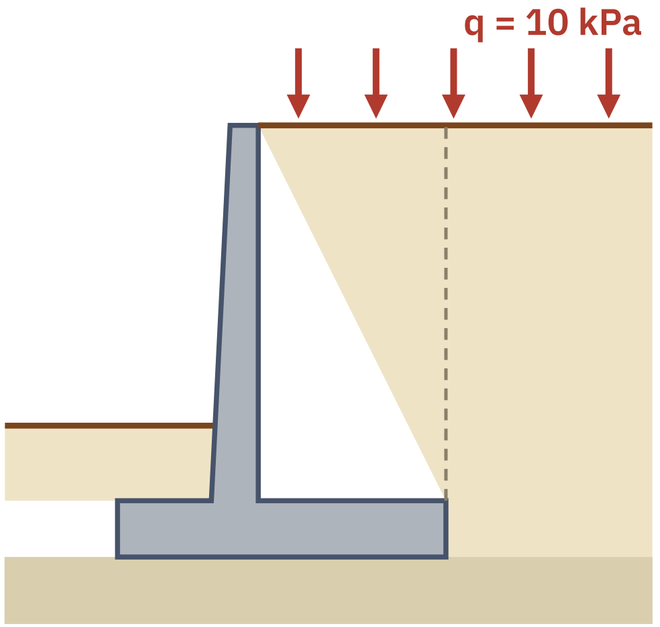
Лекция по геотехнике · Подпорные стены

Консольная подпорная стена

Лекция: внешняя устойчивость железобетонной консольной подпорной стены (сдвиг, опрокидывание, несущая способность) и усилия в сечениях лицевой плиты, носка и пятки; блок пятки, давление грунта, вода, землетрясение, упорный зуб и разгрузочная полка; пример расчёта по каждой теме.

- Лицевая плита + фундаментная плита
- Сдвиг · опрокидывание · несущая способность
- Усилия в сечениях лицевой плиты, носка и пятки
- Упорный зуб · разгрузочная полка
- Вода и землетрясение



Что мы изучим на этой лекции?

- Консольная подпорная стена: **лицевая плита + фундаментная плита** (носок L_t, пятка L_h), определение её веса и центра тяжести по составным частям
- **Грунтовый блок** над пяткой и **вертикальная плоскость давления** у задней грани фундамента; активный распор, пригрузка и передний пассивный отпор
- Интерпретация проверок **на сдвиг, опрокидывание, эксцентриситет и несущую способность основания** и случая землетрясения (Mononobe–Okabe + инерция)
- Определять по **напряжению под подошвой** поперечные силы и моменты в плитах носка и пятки, а по распору — в **лицевой стене**
- Как **упорный зуб** и **разгрузочная полка** повышают запас устойчивости; влияние воды и противодавления
- Понимание того, **как скорректировать** сечение, не удовлетворяющее условиям (сдвиг и эксцентриситет при землетрясении)

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

Все величины приведены на 1.00 m длины стены. Пример: лицевая плита H = 4.0 m, фундаментная плита 0.60 m, железобетонная стена B = 3.5 m (24 kN/m³), q = 10 kPa.

Лицевая плита, фундаментная плита и конструкция носка

ТЕОРИЯ

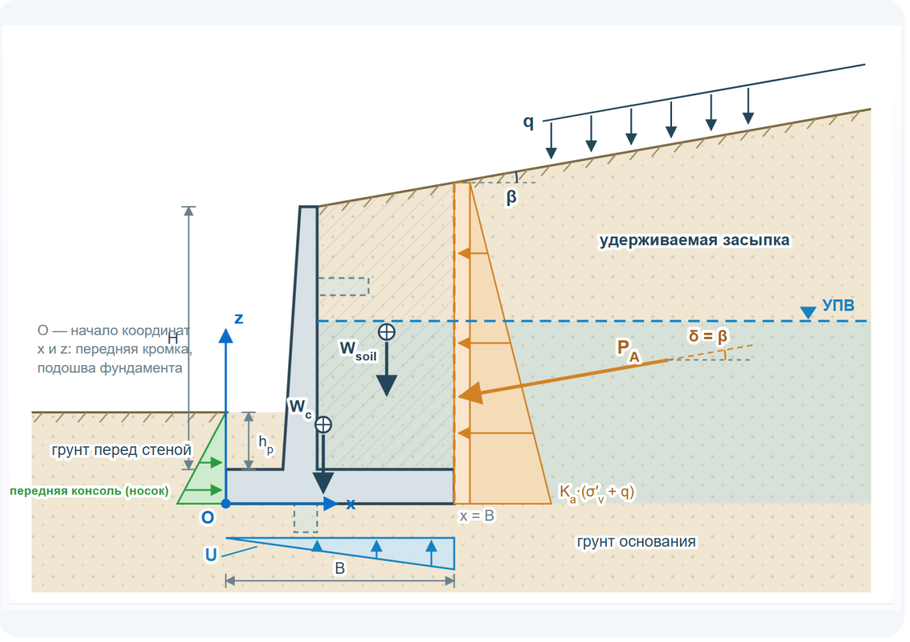
Консольная подпорная стена сопротивляется сдвигу и опрокидыванию также **за счёт веса грунта над фундаментной плитой**: удерживающим является не только собственный вес стены, но и блок грунта над пяткой. Модуль:

$$B = L_t + t_b + L_h \qquad z_T = t_f + H$$

Лицевая плита: высота H; толщина вверху t_t, внизу t_b (тыльная грань вертикальная, лицевая — наклонная); **фундаментная плита**: толщина t_f, носок L_t, пятка L_h; бетон 24 kN/m³.

Грунт: несвязная засыпка (c′ = 0), горизонтальная или наклонная поверхность, пригрузка q, грунтовые воды, спереди на фундаментной плите — засыпка высотой h_p.

Варианты: упорный зуб, разгрузочная полка; **проверки**: сдвиг, опрокидывание, эксцентриситет, несущая способность; **усилия в сечениях**: лицевая плита, носок, пятка, полка, зуб.



Фундаментная плита + прямоугольник лицевой плиты + треугольник лицевой плиты

ТЕОРИЯ

Вес стены разбивается на три простые фигуры (площадь и центр тяжести известны); его момент относительно носка является удерживающим:

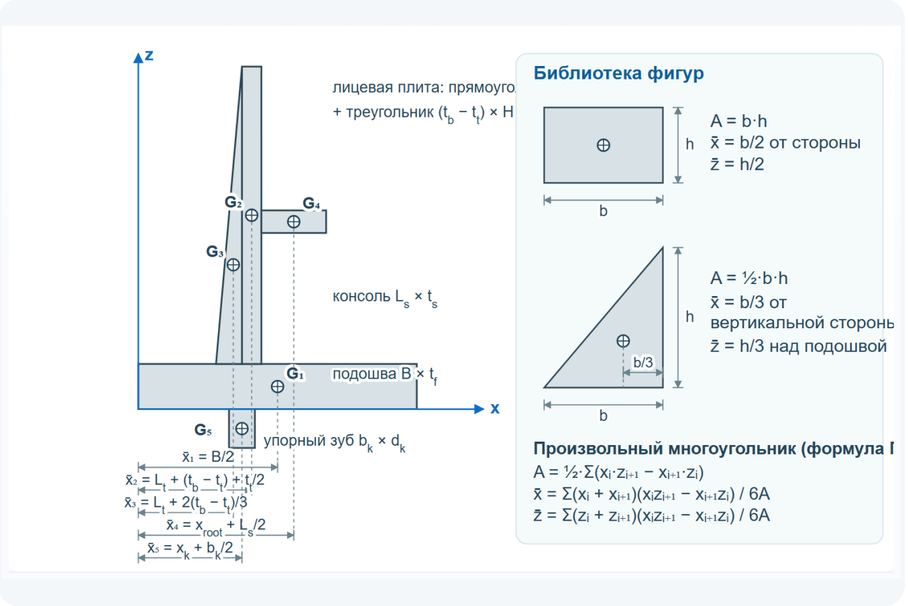
$$W_i = \gamma_c A_i \qquad W_c = \sum W_i \qquad \bar{x}_c = \frac{\sum W_i \bar{x}_i}{W_c} \qquad \bar{z}_c = \frac{\sum W_i \bar{z}_i}{W_c}$$

Фундаментная плита: A = B t_f, $\bar{x}$ = B/2, $\bar{z}$ = t_f/2.

Прямоугольник лицевой плиты (примыкает к задней грани): A = t_tH, $\bar{x}$ = L_t + (t_b − t_t) + t_t/2, $\bar{z}$ = t_f + H/2.

Треугольник лицевой плиты (наклон передней грани): A = ½(t_b − t_t)H, $\bar{x}$ = L_t + 2(t_b − t_t)/3, $\bar{z}$ = t_f + H/3.

В ведомости сил стена — одна позиция: F_z = −W_c в точке $\bar{x}_c$; $\bar{z}_c$ используется только для горизонтальной инерции (землетрясение).



Условие

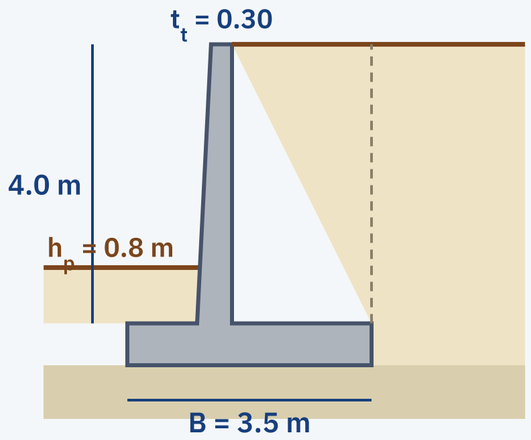
ПРИМЕР

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Площадь, вес и положение трёх частей; W_c, $\bar{x}_c$, $\bar{z}_c$.

Дано

Сечение	$H = 4.0$ m; $t_t = 0.30$, $t_b = 0.50$ m; $L_t = 1.00$, $L_h = 2.00$ m; $t_f = 0.60$ m (B = 3.5 m)
Материал	железобетон: $\gamma_c = 24$ kN/m^3



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Части (напр., треугольник: A = ½(0.50 − 0.30)(4.0) = 0.40; $\bar{x}$ = 1.00 + 2(0.20)/3 = 1.133; $\bar{z}$ = 0.60 + 4.0/3 = 1.933)

Часть	A (m²)	$\bar{x}$ (m)	$\bar{z}$ (m)	W = 24A (kN/m)	W·$\bar{x}$	W·$\bar{z}$
Фундаментная плита	2.100	1.750	0.300	50.40	88.20	15.12
Прямоугольник лицевой плиты	1.200	1.350	2.600	28.80	38.88	74.88
Треугольник по боковой поверхности	0.400	1.133	1.933	9.60	10.88	18.56
Итого				**88.80**	**137.96**	**108.56**

2 Центр тяжести

$$\bar{x}_c = \frac{137.96}{88.80} = \mathbf{1.554}\ \text{m} \qquad \bar{z}_c = \frac{108.56}{88.80} = \mathbf{1.223}\ \text{m}$$

Вес стены **W_c = 88.80 kN/m**, $\bar{x}_C$ = 1.55 m от носка, $\bar{z}_C$ = 1.22 m от подошвы; его момент M = −137.96 kN·m/m (удерживающий).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Грунт и плоскость давления, перемещающиеся вместе со стеной

ТЕОРИЯ

Грунт над пяткой фундаментной плиты не может сдвигаться относительно плиты: при перемещении стены он перемещается **вместе с ней**. Плоскости разрушения начинаются не от тыльной грани лицевой плиты, а **от задней кромки пятки**. Свободное тело = стена + блок над пяткой; его внешняя грань — **вертикальная плоскость давления** при x = B (грунт по грунту: трения по стене нет, распор действует под углом δ = β):

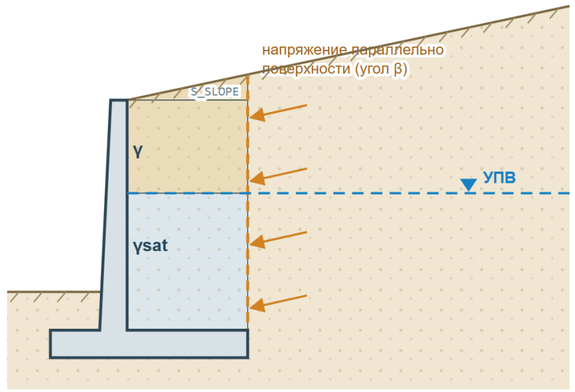
Вес блока пятки $W_s = \gamma L_h H$ (разделяется на влажную и водонасыщенную зоны; так как расчёт ведётся по полным напряжениям, ниже уровня воды принимается γ_{sat}, а равнодействующая давления воды учитывается отдельной позицией).

Спереди (у носка) засыпка над фундаментной плитой (h_p) перемещается вместе с плитой: вертикальная нагрузка W_{toe}.

Пригрузка над пяткой $\mathbf{Q_{heel} = qL_h}$ действует в благоприятную сторону, но, будучи нагрузкой, которой может и не быть, **не входит ни в одну проверку**; её боковое воздействие учитывается всегда.

Высота плоскости давления $h = t_f + H$ (с учётом подъёма поверхности).

Вертикальная плоскость по задней кромке подошвы (все методы)



Условие

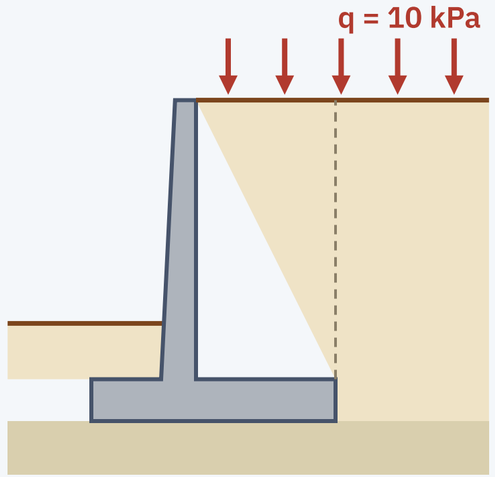
ПРИМЕР

Дано

Стена	**Разрез из примера 1; высота засыпки перед стеной $h_p = 0.80$ m (над фундаментной плитой)**
Грунт	**сухая засыпка: $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30^\circ$; горизонтальная поверхность**
Пригрузка	$q = 10$ **kPa**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Вес и положение блока пятки; **засыпка перед стеной**; **Q_{heel}**; суммарная вертикальная нагрузка N.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Блок пятки (прямоугольник L_h × H за лицевой плитой)

$$A_s = L_h H = 2.00(4.0) = 8.0\ \text{m}^2 \qquad W_s = 18(8.0) = \mathbf{144.0}\ \text{kN/m}$$

$$\bar{x}_s = L_t + t_b + \frac{L_h}{2} = 2.50\ \text{m} \qquad \bar{z}_s = t_f + \frac{H}{2} = 2.60\ \text{m}$$

2 Засыпка перед стеной (трапеция: у основания L_t = 1.00, вверху $x_{toe}(h_p)$ = 1.04) и пригрузка

$$A_{toe} = \tfrac{1}{2}(1.00 + 1.04)(0.80) = 0.816\ \text{m}^2 \quad W_{toe} = 18(0.816) = \mathbf{14.69}\ \text{kN/m}\ (\bar{x} = 0.510)$$

$$Q_{heel} = qL_h = 10(2.00) = \mathbf{20.0}\ \text{kN/m}\ \text{(не входит ни в одну проверку)}$$

N = W_c + W_s + W_{toe} = 88.80 + 144.00 + 14.69 = **247.49 kN/m**; Q_{heel} = 20.00 kN/m — позиция, оставшаяся в таблице «неиспользуемой».

Проверить решение в GeoTerva ↗

Сила давления в вертикальной плоскости, пригрузка и смешанное пассивное давление

ТЕОРИЯ

Плоскость давления находится на высоте h = t_f + H. Поскольку засыпка горизонтальна и δ = β = 0, Rankine = Coulomb:

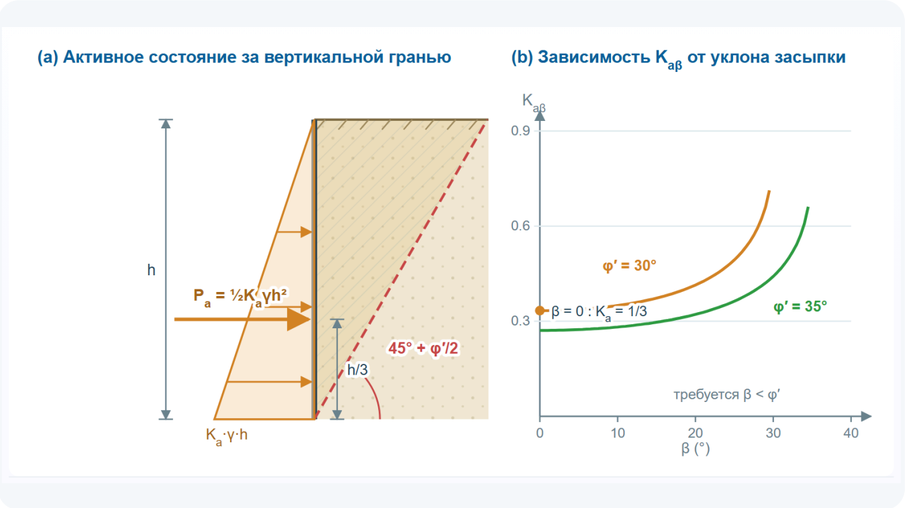
$$K_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'} \qquad P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2\ (h/3) \qquad P_Q = K_a q h\ (h/2)$$

При наклонной засыпке напряжение на плоскости параллельно поверхности ($K_{a\beta}$), а вертикальная составляющая распора является удерживающей. Передний отпор (только при сдвиге):

$$K_{mob} = wK_p + (1-w)K_0 \qquad P_P = \tfrac{1}{2}K_{mob}\gamma D_p^2\ (D_p/3) \qquad D_p = t_f + h_p$$

w = 1/3 по умолчанию; если грунт перед стеной может быть удалён, учитываемая часть сопротивления уменьшается заданием h_p = 0 или h_{ignore}; **сопротивление грунта перед стеной не используется при проверках на опрокидывание и несущую способность**.

Подробности (равенство Rankine/Coulomb, K_{mob}, h_{ignore}) приведены в презентации о гравитационной подпорной стене.



Условие

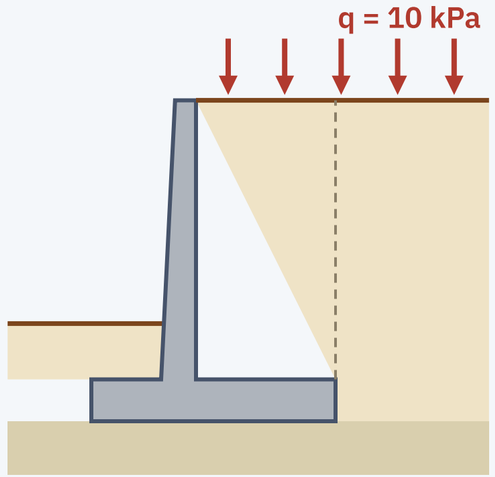
ПРИМЕР

Дано

Стена и грунт	**Стена из примеров 1–2: h = t_f + H = 4.60 m;** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30^\circ$**; горизонтальная поверхность;** $q = 10$ **kPa**
Грунт перед стенкой	$D_p = t_f + h_p = 1.40$ **m; w = 1/3**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

P_A, P_Q, P_P и опрокидывающий момент относительно носка.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 K_a = 0.3333; силы давления (h = 4.60 m)

$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2 = \tfrac{1}{2}(0.3333)(18)(21.16) = \mathbf{63.48}\ \text{kN/m} \quad (z = 1.533\ \text{m})$$

$$P_Q = K_a q h = 0.3333(10)(4.6) = \mathbf{15.33}\ \text{kN/m} \quad (z = 2.30\ \text{m})$$

2 Сопротивление перед стенкой: K_{mob} = ⅓(3.00) + ⅔(0.50) = 1.333

$$P_P = \tfrac{1}{2}(1.333)(18)(1.40)^2 = \mathbf{23.52}\ \text{kN/m} \quad (z = D_p/3 = 0.467\ \text{m})$$

3 Горизонтальная сила давления и опрокидывающий момент (относительно носка)

$$\Sigma H_{drive} = 63.48 + 15.33 = \mathbf{78.81}\ \text{kN/m}$$

$$M_o = 63.48(1.533) + 15.33(2.30) = 97.34 + 35.27 = \mathbf{132.60}\ \text{kN·m/m}$$

Проверить решение в GeoTerva ↗

Четыре проверки по одной и той же ведомости сил

ТЕОРИЯ

$$FS_s = \frac{\mu_b N + P_{toe}}{\Sigma H_{drive}} \qquad FS_o = \frac{\Sigma M_{res}}{\Sigma M_{ov}} \qquad x_R = -\frac{\Sigma M}{V} \qquad e = \frac{B}{2} - x_R$$

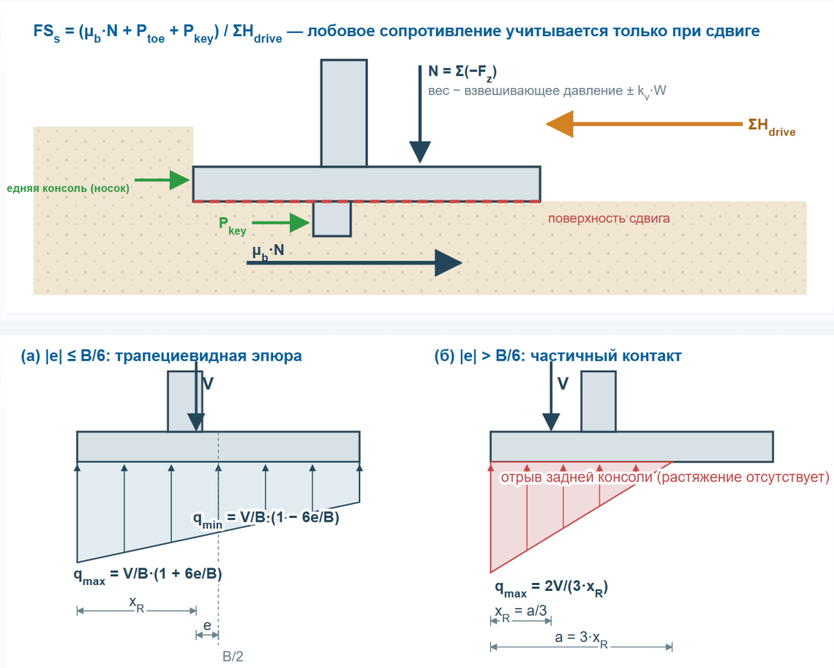
$$|e| \le \frac{B}{6}: \quad q_{max,min} = \frac{V}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \qquad |e| > \frac{B}{6}: \quad q_{max} = \frac{2V}{3x_R}$$

Сдвиг: N — эффективная нормальная сила (без Q_{heel}, с вычетом противодавления); $\mu_b = \tan \delta_b$; сцепление отсутствует.

Опрокидывание: относительно носка (передней нижней кромки фундаментной плиты); составляющие $-zF_x$ и xF_z каждой позиции учитываются со своим знаком; сопротивление грунта перед стеной не вводится.

Несущая способность: если равнодействующая находится в средней трети подошвы ($|e| \le B/6$), подошва полностью контактирует с грунтом; в противном случае грунт не воспринимает растяжение, и контакт имеет место только на длине $a = 3x_R$.

Требуется: при статическом нагружении $FS_s \ge 1.5$, $FS_o \ge 2.0$; при землетрясении ≥ 1.1; $q_{max} \le q_{all}$.



Условие

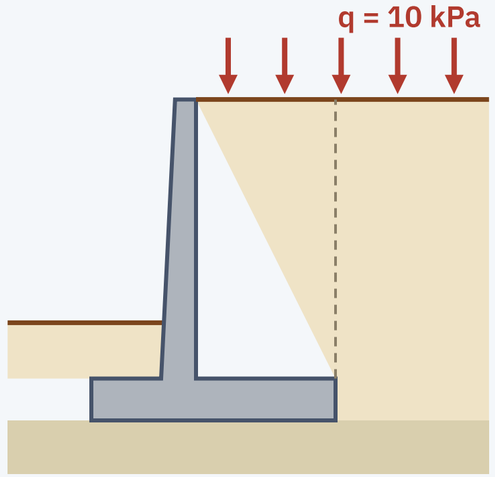
ПРИМЕР

Дано

Стена и нагрузки	**Стена из примеров 1–3:** $B = 3.5$ **m;** $W_c = 88.8$, $W_s = 144.0$, $W_{toe} = 14.69$ kN/m; $P_A = 63.48$, $P_Q = 15.33$ kN/m
Сопротивление	$\mu_b = 0.55$**;** $P_P = 23.52$ **kN/m;** $q_{all} = 200$ **kPa**
Требуемый	$FS_s \geq 1.5$, $FS_o \geq 2.0$**; подошва в полном контакте**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

FS_s, FS_o, x_R, e, q_{max}, q_{min} и результаты.



Решение (1/3)

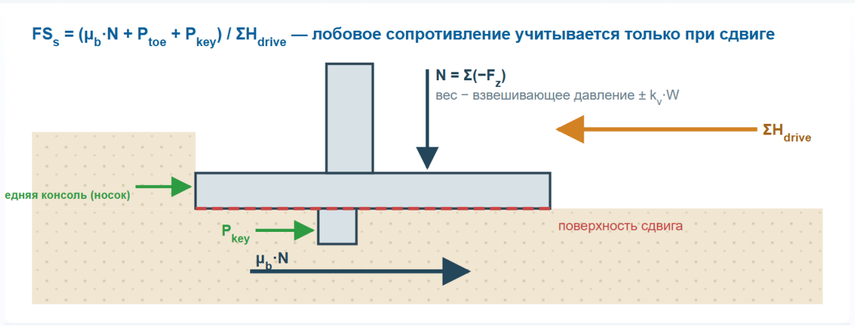
РЕШЕНИЕ

1 Трение по подошве ($N = W_c + W_s + W_{toe}$)

$$N = 88.8 + 144.0 + 14.69 = \mathbf{247.49}\ \text{kN/m}$$

$$\mu_b N = 0.55(247.49) = 136.12\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{136.12 + 23.52}{78.81} = \mathbf{2.026} \ \geq 1.5\ \checkmark$$



Решение (2/3)

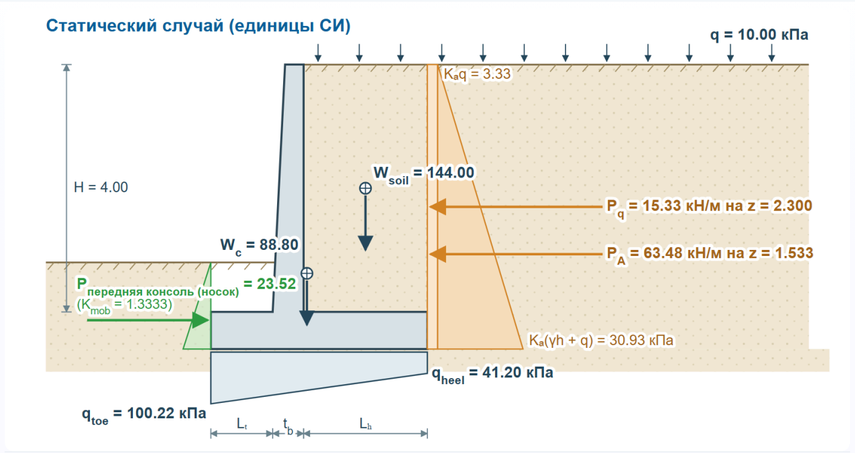
РЕШЕНИЕ

2 Опрокидывающий момент (распоры) и удерживающий момент (стена, блок у пятки, засыпка спереди)

$$M_o = 97.34 + 35.27 = \mathbf{132.60}$$

$$M_r = 137.96 + 360.00 + 7.49 = \mathbf{505.45}\ \text{kN·m/m}$$

$$FS_o = \frac{505.45}{132.60} = \mathbf{3.812}\ \geq 2.0\ \checkmark$$



Решение (3/3)

РЕШЕНИЕ

3 Положение равнодействующей и эксцентриситет

$$\Sigma M = M_o - M_r = -372.85$$

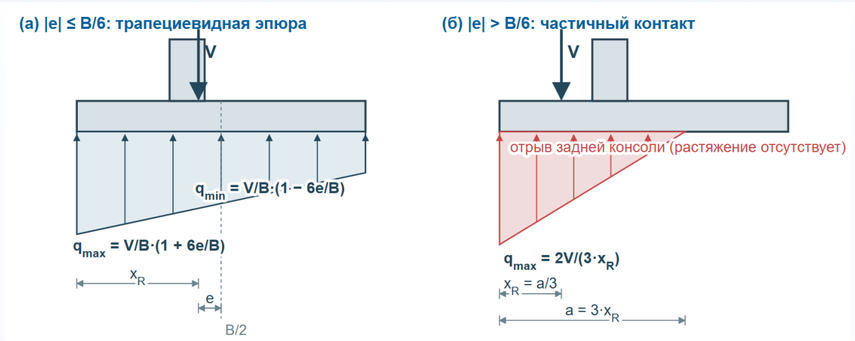
$$x_R = -\frac{\Sigma M}{V} = \frac{372.85}{247.49} = \mathbf{1.5065}\ \text{m}$$

$$e = \frac{B}{2} - x_R = \mathbf{0.2435}\ \text{m} \ \le\ \frac{B}{6} = 0.583\ \checkmark$$

4 Напряжения по подошве (полный контакт)

$$q_{max} = \frac{247.49}{3.5}\left(1 + \frac{6(0.2435)}{3.5}\right) = \mathbf{100.22}\ \text{kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{41.20}\ \text{kPa}$$



FS_s = **2.03**, FS_o = **3.81**, e = 0.243 m, q_{max} = **100.2 kPa** ≤ 200, q_{min} = 41.2 kPa > 0: **при статической нагрузке все проверки выполняются**.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Сила давления по Mononobe–Okabe и добавление сил инерции

ТЕОРИЯ

При землетрясении вместо статического распора $P_A + P_Q$ принимается распор P_{AE} по **Mononobe–Okabe**; сила инерции стены, блока пятки и грунта перед стеной $k_h W$, приложенная в центрах тяжести, также толкает стену вперёд (при $k_V > 0$ рассматриваются оба направления). В вертикальной плоскости, при горизонтальной засыпке:

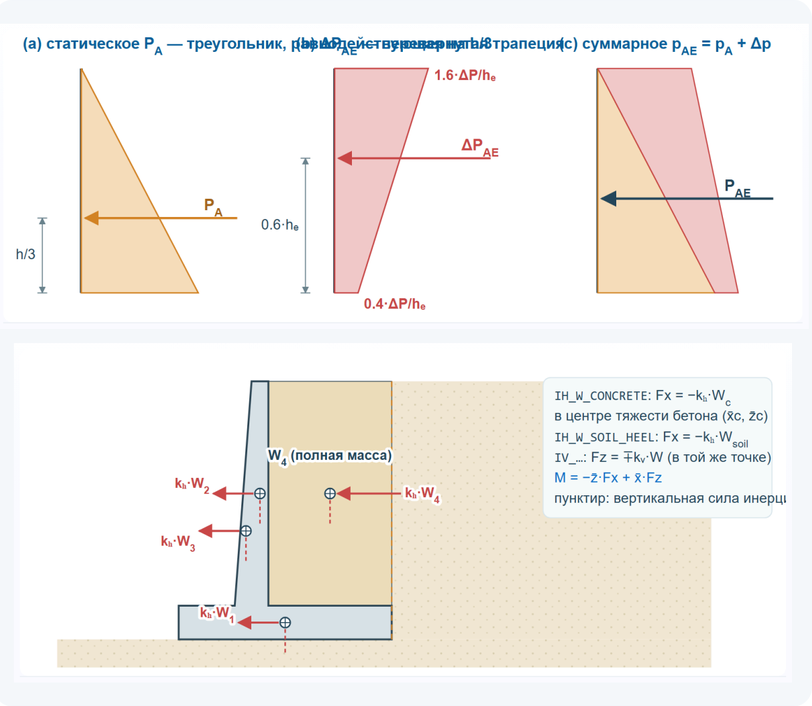
$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi'-\theta)}{\cos^2\theta\left[1+\sqrt{\dfrac{\sin\varphi'\sin(\varphi'-\theta)}{\cos\theta}}\right]^2}$$

$$P_{AE} = \left(\tfrac{1}{2}\gamma h^2 + qh\right)K_{AE} \qquad \Delta P_{AE} = P_{AE} - (P_A + P_Q)\ \ (0.6h)$$

ΔP_{AE} распределяется по перевёрнутой трапеции (вверху 1.6ΔP/h, внизу 0.4ΔP/h); статическая часть сохраняет свою форму. При наличии воды добавляется гидродинамическое давление $(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$.

Пассивное сопротивление спереди, принимаемое в расчёт, умножается на $\eta_{p,E}$; **по умолчанию 0** (запас по сдвигу обеспечивается только трением по подошве).

Если равнодействующая выходит за пределы средней трети основания, возникает **частичный контакт** ($q_{max} = 2V/(3x_R)$).



Условие

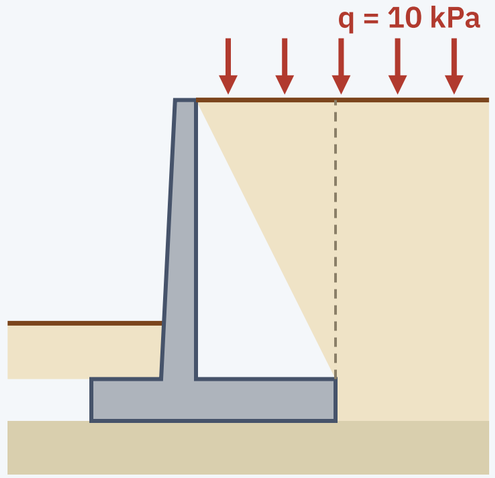
ПРИМЕР

Дано

Стена и грунт	**Стена из Примеров 1–4 (статика: FS_s = 2.03; FS_o = 3.81)**
Землетрясение	$k_h = 0.15$, $k_v = 0$; $\eta_{p,E} = 0$; **требуется** $FS_s,\ FS_o \geq 1.1$; **подошва должна быть полностью в контакте с грунтом (|e| ≤ B/6)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

K_{AE}, **P_{AE}**, **$\bar{z}$**, силы инерции; FS_s, FS_o, e, q_{max} и результат каждой проверки.



Решение (1/4)

РЕШЕНИЕ

1 Сейсмический угол и коэффициент

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

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

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

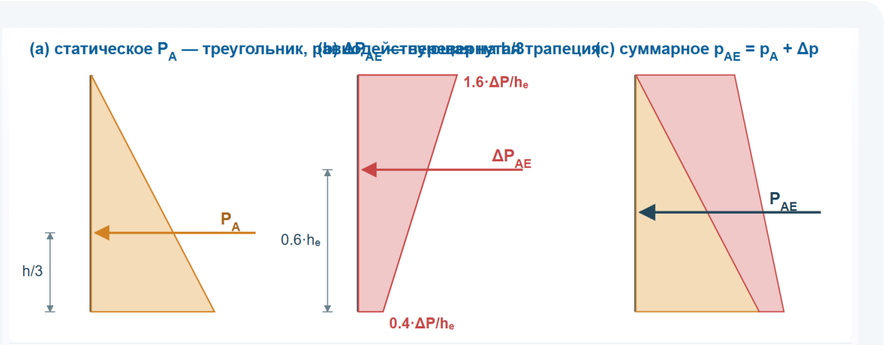
2 Динамический распор (статический $P_A + P_Q$ = 78.81 kN/m) и точка приложения

$$P_{AE} = (190.44 + 46.0)(0.4329) = \mathbf{102.36}\ \text{kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 102.36 - 78.81 = 23.55\ \text{kN/m}\ \ (0.6h)$$

$$\bar{z}_{AE} = [63.48(1.533) + 15.33(2.30) + 23.55(2.76)]/102.36$$

$$= \mathbf{1.930}\ \text{m}$$



Решение (2/4)

РЕШЕНИЕ

3 Инерционные силы $k_h W$ и сдвиг (пассивное сопротивление не учитывается)

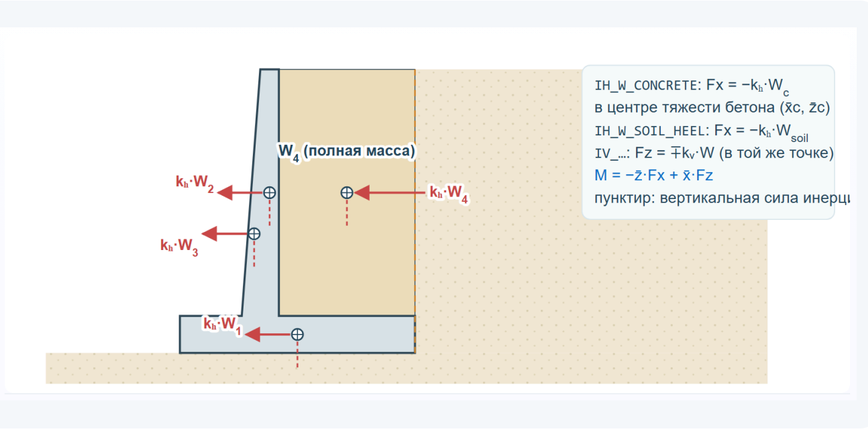
$$IH_c = 0.15(88.8) = 13.32 \;\; (z = 1.223 \text{ m})$$

$$IH_s = 0.15(144.0) = 21.60 \;\; (z = 2.60 \text{ m})$$

$$IH_{toe} = 0.15(14.69) = 2.20 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma H_{drive} = 102.36 + 13.32 + 21.60 + 2.20 = 139.49$$

$$FS_{s,E} = \frac{\mu_b N}{\Sigma H_{drive}} = \frac{136.12}{139.49} = \mathbf{0.976} \;\; < 1.1 \;\; \text{✗}$$



Решение (3/4)

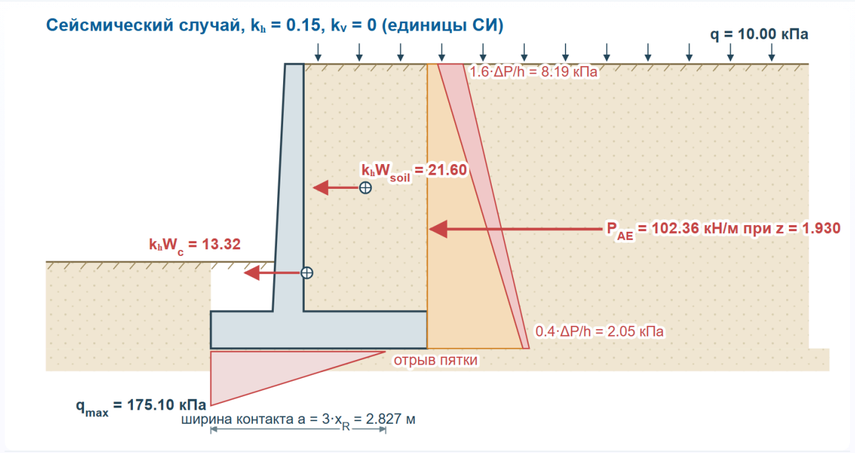
РЕШЕНИЕ

4 Опрокидывание (плечи моментов: $\bar{z}_{AE}$ = 1.930; z_c = 1.223; 2.60; 1.003 m)

$$M_{o,E} = 197.60 + 16.28 + 56.16 + 2.21 = 272.26$$

$$FS_{o,E} = \frac{505.45}{272.26} = \mathbf{1.857} \;\geq 1.1 \;\checkmark$$

$$x_R = \frac{505.45 - 272.26}{247.5} = 0.942 \text{ m}$$



Решение (4/4)

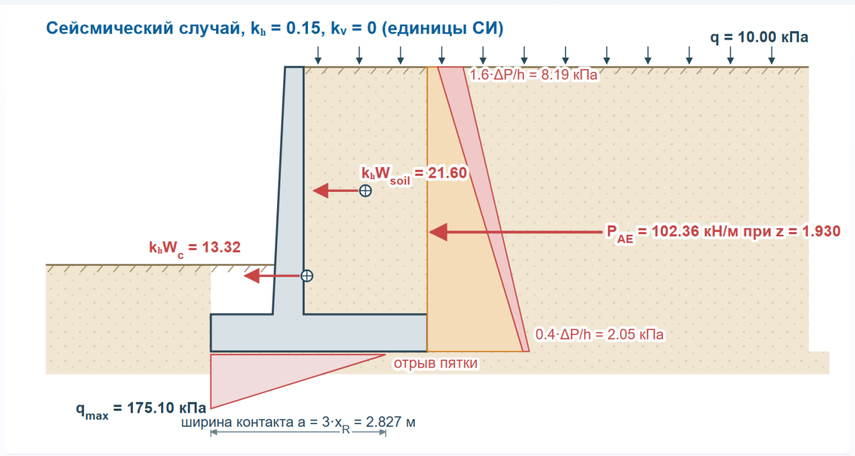
РЕШЕНИЕ

5 Эксцентриситет и частичный контакт

$$e = \frac{B}{2} - x_R = 1.750 - 0.942 = \mathbf{0.808}\ \text{m} > \frac{B}{6} = 0.583 \quad ✗$$

$$a = 3x_R = 2.827\ \text{m} \quad \text{(в контакте только эта длина)}$$

$$q_{max} = \frac{2V}{a} = \frac{2(247.5)}{2.827} = \mathbf{175.1}\ \text{kPa} \quad q_{min} = 0$$



При землетрясении не удовлетворяются **сдвиг (FS_s = 0.98 < 1.1)** и **эксцентриситет (e = 0.81 m > B/6)**; опрокидывание (FS_o = 1.86) и q_{max} = 175.1 kPa обеспечены. Сечение **необходимо пересмотреть** (Пример 6).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

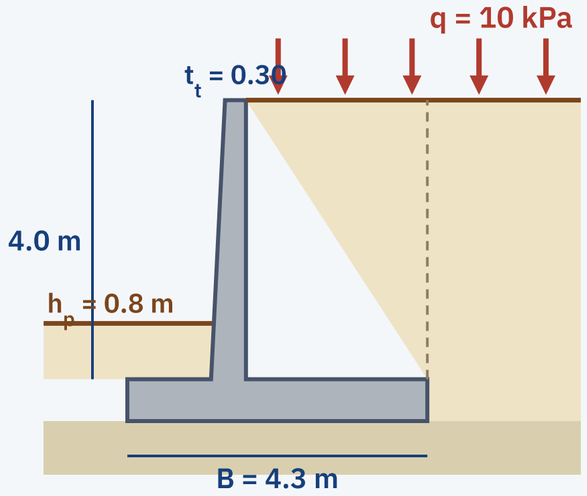
ПРИМЕР

Дано

Проблема	**В примере 5 при землетрясении FS_s = 0.98 < 1.1 и e = 0.81 m > B/6 = 0.58 m**
Предлагаемое изменение	**носок и пятка удлиняются: $L_t = 1.20$ m, $L_h = 2.60$ m (B = 4.30 m); остальные размеры и грунт те же**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

С новым сечением статические и сейсмические **FS_s**, **FS_o**, **e**, **q_{max}**; достаточно ли сечение?



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Та же нагрузка, новая геометрия (модуль; B = 4.30 m, W_c = 100.3 kN/m, N = 305.1 kN/m)

	Текущий (B = 3.5 m)	Скорректированный (B = 4.3 m)	Требуемый
Статический FS_s	2.026	2.427	≥ 1.5
Статический FS_o	3.812	5.753	≥ 2.0
Статический e (m) / q_{max} (kPa)	0.243 / 100.2	0.084 / 79.3	|e| ≤ B/6
Сейсмический FS_s	0.976 ✗	1.133 ✓	≥ 1.1
Сейсмический FS_o	1.857	2.630	≥ 1.1
Сейсмическое воздействие e (m) / контакт	0.808 / частично ✗	0.600 / полный ✓ (B/6 = 0.717)	|e| ≤ B/6
Землетрясение q_{max} (kPa)	175.1	130.4	≤ 200

Удлинение носка и пятки увеличило N с 247 до 305 kN/m и повысило трение: при землетрясении **FS_s = 1.13 ≥ 1.1**, равнодействующая оказалась в пределах средней трети (e = 0.60 ≤ B/6 = 0.717): **все проверки выполняются**. Альтернативы: упорный зуб + $\eta_{p,E}$ (Пример 9), более широкая пятка.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Лицевая плита, носок и пятка: критические сечения

ТЕОРИЯ

После обеспечения внешней устойчивости определяются **усилия в сечениях** элементов. **Лицевая плита** — консоль, нагруженная давлением с тыльной стороны и защемлённая в основании (над фундаментной плитой):

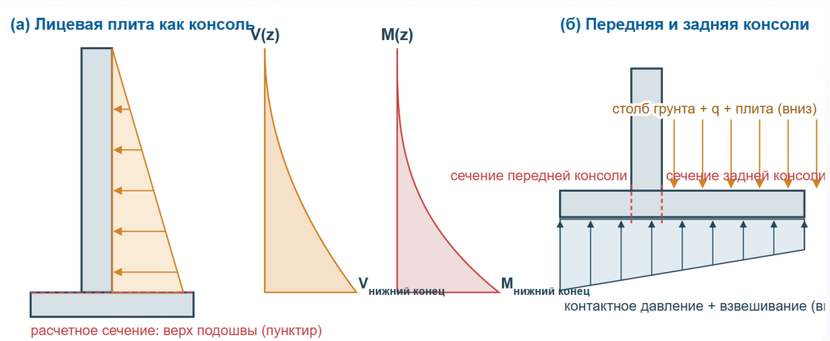
$$V_{st} = K_a\left(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH\right) \qquad M_{st} = K_a\left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2}\right)$$

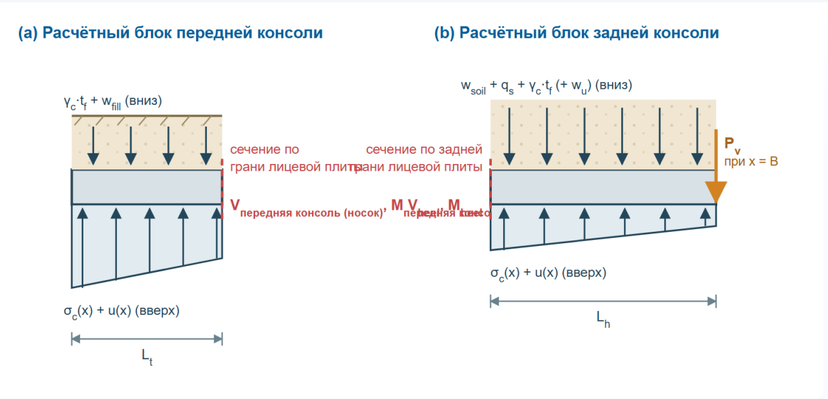
При землетрясении: $V_E = V + \Delta P_{AE,st} + k_h W_{body}$, $M_E = M + \Delta P_{AE,st}(0.6H) + k_h W_{body}\bar{z}$ ($\Delta P_{AE,st} = K_{AE}(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH) - V_{st}$). **Носок и пятка** — плиты, защемлённые по граням лицевой плиты; нагрузка = напряжение по подошве − вес плиты и грунта над ней:

$$V_{toe} = L_t\frac{q_0 + q_L}{2} - w_{toe}L_t \qquad M_{toe} = \frac{L_t^2(2q_0 + q_L)}{6} - \frac{w_{toe}L_t^2}{2}$$

$$V_{heel} = w_h L_h - L_h\frac{q_a + q_b}{2} \qquad M_{heel} = \frac{w_h L_h^2}{2} - \frac{L_h^2(q_a + 2q_b)}{6}$$

$w_{toe} = \gamma_c t_f + \gamma h_p$; $w_h = \gamma H + q + \gamma_c t_f$; q_0, q_L, q_a, q_b — напряжения по подошве в критических сечениях (линейное распределение).





Условие

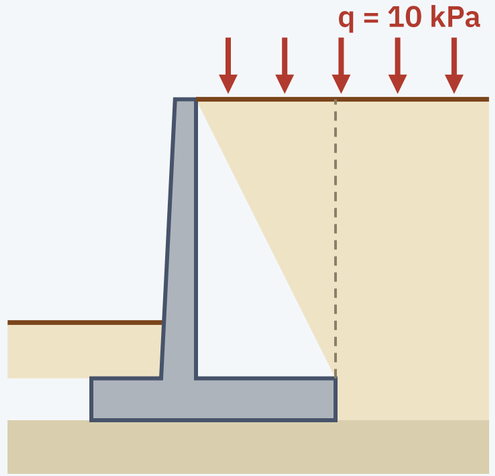
ПРИМЕР

Дано

Стена и грунт	**Стена из примеров 1–5:** $H = 4.0$ **m;** $\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30°$**;** $q = 10$ **kPa; лицевая плита:** $t_t = 0.30$**,** $t_b = 0.50$ **m**
Землетрясение	$k_h = 0.15$ **(**$K_{AE} = 0.4329$**)**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

V и **M** у основания лицевой плиты: в статическом и сейсмическом случаях.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Статическое (у основания лицевой плиты, H = 4.0 m)

$$V_{st} = K_a\left(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH\right) = 0.3333(144 + 40) = \mathbf{61.33}\ \text{kN/m}$$

$$M_{st} = K_a\left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2}\right) = 0.3333(192 + 80) = \mathbf{90.67}\ \text{kN·m/m}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

2 Землетрясение: сейсмическое приращение и инерция тела стены

$$\Delta P_{AE,st} = K_{AE}(184) - V_{st} = 79.66 - 61.33 = 18.33 \text{ kN/m} \quad (0.6H = 2.40 \text{ m})$$

$$k_h W_{st} = 0.15(24)(1.2 + 0.4) = 5.76 \text{ kN/m}; \qquad M_i = 10.56 \text{ kN·m/m}$$

3 Суммарные сейсмические воздействия

$$V_E = 61.33 + 18.33 + 5.76 = \mathbf{85.42} \text{ kN/m}$$

$$M_E = 90.67 + 18.33(2.40) + 10.56 = \mathbf{145.21} \text{ kN·m/m}$$

У основания лицевой плиты статические усилия **V = 61.33 kN/m, M = 90.67 kN·m/m**; при землетрясении **V_E = 85.42, M_E = 145.21** (рост момента на 60%). Железобетонное сечение подбирается по этим усилиям.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

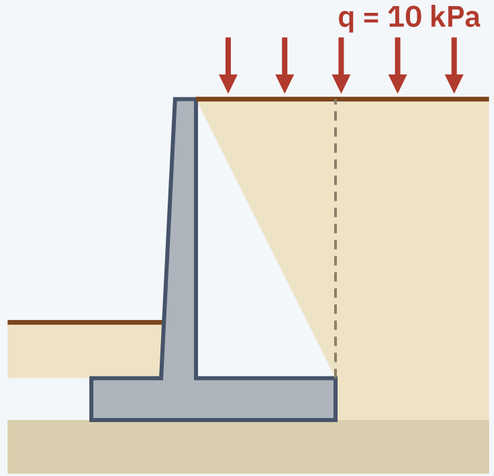
ПРИМЕР

Дано

Напряжения по подошве (Пример 4)	$q_{max} = 100.22$ **(носок),** $q_{min} = 41.20$ **kPa (конец пятки);** $B = 3.5$ **m**
Нагрузки на плиту	$L_t = 1.00$, $L_h = 2.00$ **m,** $t_b = 0.50$ **m,** $t_f = 0.60$ **m;** $\gamma_c = 24$**; засыпка перед стеной** $h_p = 0.8$ **m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Значения **V** и **M** в плитах носка и пятки у грани стены (статика); значения при землетрясении.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Напряжения по подошве в критических сечениях (линейные): у носка q_0, у грани лицевой плиты q_L и q_a, у конца пятки q_b

$$q_0 = 100.22 \qquad q_L = q_0 + (q_{min} - q_0)\frac{L_t}{B} = 83.36$$

$$q_a = q_0 + (q_{min} - q_0)\frac{L_t + t_b}{B} = 74.93 \qquad q_b = 41.20 \text{ kPa}$$

2 Носок (w_{toe} = 24(0.60) + 18(0.80) = 28.8 kPa)

$$V_{toe} = 1.00\frac{100.22 + 83.36}{2} - 28.8(1.00) = \mathbf{62.99} \text{ kN/m}$$

$$M_{toe} = \frac{1^2(2\cdot 100.22 + 83.36)}{6} - \frac{28.8(1)^2}{2} = \mathbf{32.90} \text{ kN·m/m}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Пятка (w_h = 18(4.0) + 10 + 24(0.60) = 96.4 kPa; нагрузка вниз, напряжение под подошвой вверх)

$$V_{heel} = 96.4(2.00) - 2.00\frac{74.93+41.20}{2} = \mathbf{76.67}\ \text{kN/m}$$

$$M_{heel} = \frac{96.4(2)^2}{2} - \frac{2^2(74.93+2\cdot 41.20)}{6} = \mathbf{87.92}\ \text{kN}\cdot\text{m/m}$$

Носок: **V = 62.99, M = 32.90**; пятка: **V = 76.67, M = 87.92** (носок изгибается вверх, пятка — вниз). При землетрясении (частичный контакт, модуль): носок V = 115.33, M = 62.83; пятка V = 138.28, M = 168.69: **момент в пятке возрастает в 1.9 раза**.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Упрощённый метод с упорным зубом

ТЕОРИЯ

Если трения по подошве недостаточно, под подошвой в ненарушенный грунт бетонируется **зуб**; передняя грань зуба добавляет к поверхности скольжения пассивное сопротивление грунта перед ним. Метод намеренно прост: грань зуба воспринимает **мобилизованное** давление $K_{mob}\sigma'_v$ и при сдвиге учитывается полностью; **внутренние усилия** в зубе определяются по **эпюре полного пассивного давления брутто**:

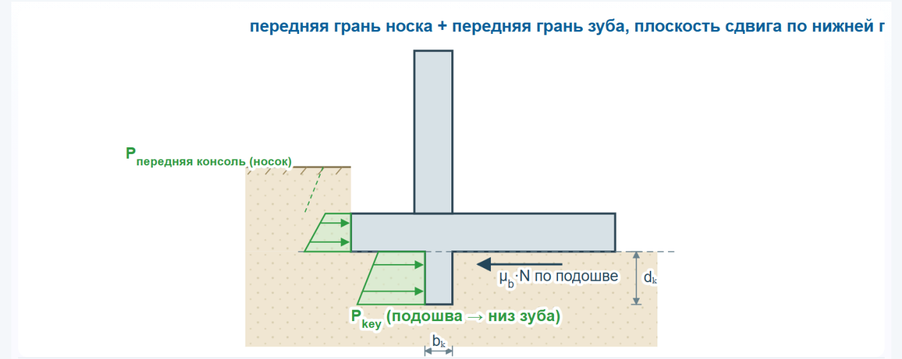
$$P_{key} = \tfrac{1}{2}\left(p_{top} + p_{bot}\right) d_k \quad (p = K_{mob}\sigma'_v) \qquad V_{key} = \tfrac{1}{2}\left(p^g_{top} + p^g_{bot}\right) d_k \quad (p^g = K_p\sigma'_v)$$

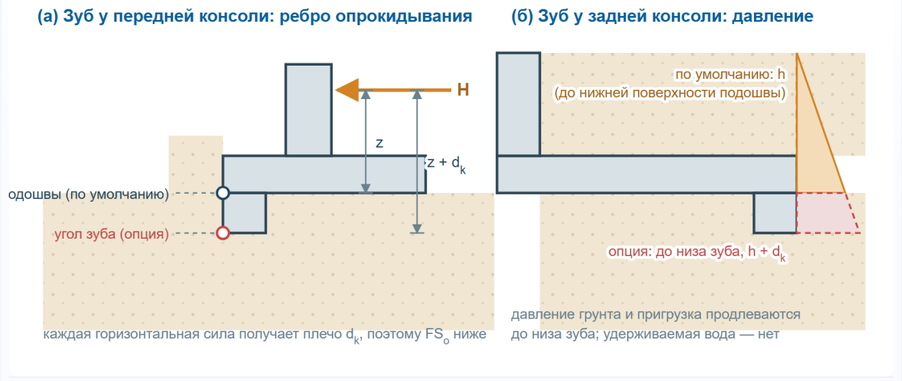
$$M_{key} = p^g_{top}\frac{d_k^2}{2} + \left(p^g_{bot} - p^g_{top}\right)\frac{d_k^2}{3}$$

Вес упорного зуба (в N_{eff}) учитывается и в статике, и при землетрясении. Пассивные сопротивления используются **только при сдвиге**; при землетрясении оба умножаются на $\eta_{p,E}$ (по умолчанию 0, т. е. не учитываются).

Центр вращения: для зуба у края носка точкой опрокидывания можно выбрать нижний передний угол фундаментной плиты (по умолчанию) или нижний передний угол зуба; для зуба у края пятки активное давление можно продлить до конца зуба.

$\Delta FS = P_{key}/\Sigma H_{drive}$ приводится в каждом случае.





Условие

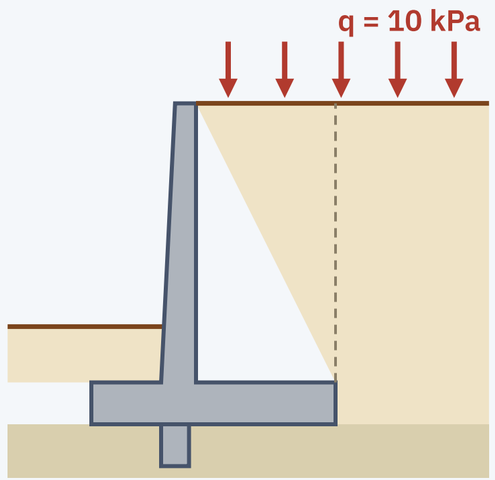
ПРИМЕР

Дано

Стена	**Стена из примеров 1–5; упорный зуб у края носка:** $x_k = 1.0$ **m,** $b_k = 0.40$ **m,** $d_k = 0.60$ **m (ниже подошвы)**
Грунт	$\gamma = 18$ kN/m^3, $\varphi' = 30^\circ$**; грунт перед стеной** $D_f = 1.4$ **m (2.0 m ниже дна котлована);** $w = 1/3$ **(**$K_{mob} = 1.333$**)**
Землетрясение	$\eta_{p,E} = 0$ **(по умолчанию) и** $\eta_{p,E} = 0.5$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Сопротивление упорного зуба **P_{key}**, статический **FS_s**; внутренние усилия в зубе **V_{key}**, **M_{key}**; влияние $\eta_{p,E}$ при землетрясении.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Суммарное давление на грани упорного зуба ($\sigma'_v = 18\,z$; $z = 1.4 \to 2.0$ m)

$$p_{top} = K_{mob}(25.2) = 33.6 \qquad p_{bot} = K_{mob}(36.0) = 48.0 \text{ kPa}$$

$$P_{key} = \tfrac{1}{2}(33.6 + 48.0)(0.60) = \mathbf{24.48} \text{ kN/m}$$

2 Статический сдвиг (вес зуба 5.76 kN/m входит в N; пассивное сопротивление у носка учитывается в размере 23.52)

$$N_{eff} = 253.25 \qquad \mu_b N = 139.29 \text{ kN/m}$$

$$FS_s = \frac{139.29 + 23.52 + 24.48}{78.81} = \mathbf{2.376} \;\; (\text{без зуба } 2.066)$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Внутренние усилия в сечении упорного зуба: брутто, полный пассивный отпор (K_p = 3.00): p^g_{top} = 75.6; p^g_{bot} = 108.0 kPa

$$V_{key} = \tfrac{1}{2}(75.6 + 108.0)(0.60) = \mathbf{55.08}\ \text{kN/m}$$

$$M_{key} = 45.36(0.30) + 9.72(0.40) = \mathbf{17.50}\ \text{kN·m/m}$$

Зуб увеличил статический коэффициент запаса на сдвиг с 2.07 до **2.38** (ΔFS = 0.31). При землетрясении при $\eta_{p,E}$ = 0 зуб **не даёт вклада**; при $\eta_{p,E}$ = 0.5 $FS_{s,E}$ возрастает с 0.98 до **1.16** (условие ≥ 1.1 выполняется), но эксцентриситет (0.80 m > B/6) сохраняется: поэтому изменение геометрии в Примере 6 эффективнее.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Гидростатическое давление воды с обеих сторон, линейное противодавление на подошву

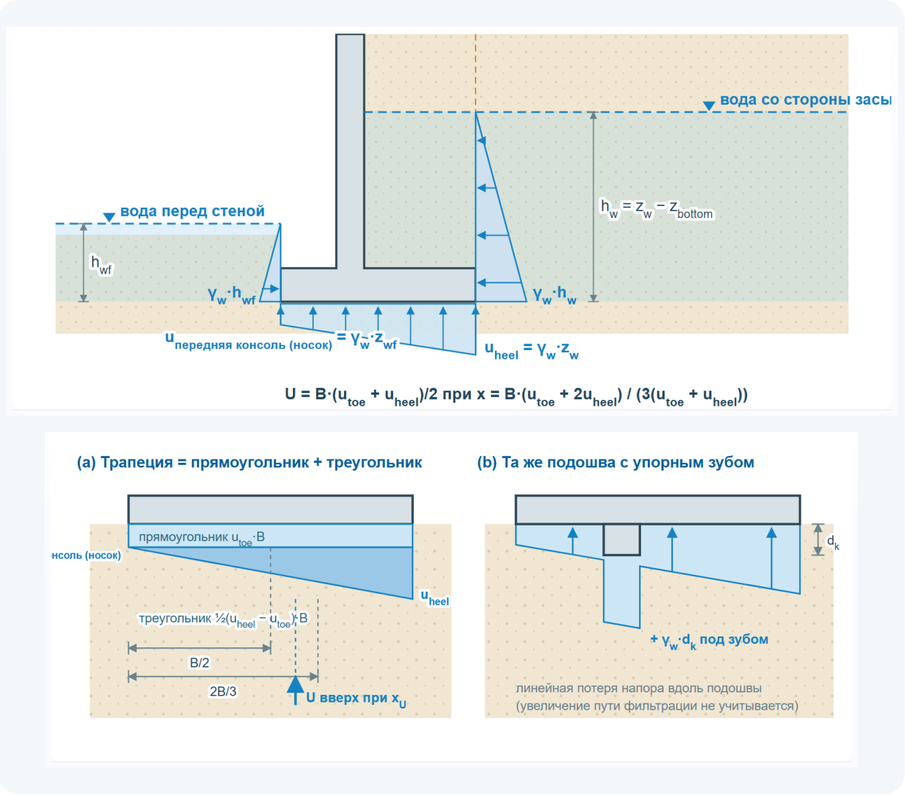
ТЕОРИЯ

Давление воды изотропно и действует по нормали к любой поверхности. Свободное тело ограничено водой по трём границам: плоскость заднего давления, лицевая грань стенки и нижняя поверхность подошвы. Каждая из них — отдельная позиция в ведомости сил; вес грунта учитывается по полным напряжениям (γ_{sat}):

$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_w^2 \;\; (h_w/3) \qquad U = \frac{B(u_{toe}+u_{heel})}{2} \qquad x_U = \frac{B(u_{toe}+2u_{heel})}{3(u_{toe}+u_{heel})}$$

Противодавление действует вверх: уменьшает N (а с ним и трение) и добавляет опрокидывающий момент. Давление под подошвой изменяется линейно между усилиями от воды у носка и у пятки.

В сейсмическом случае дополнительно учитывается гидродинамическое давление свободной поровой воды $(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$ $(0.4h_w)$.



Условие

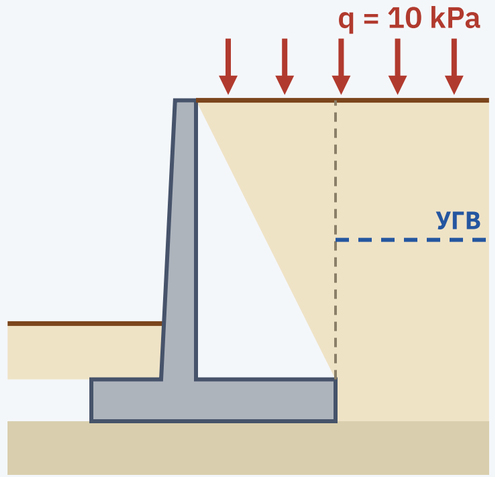
ПРИМЕР

Дано

Стена и грунт	**Стена и засыпка из примеров 1–4 ($\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 20$ kN/m^3); статический случай**
Вода	**в засыпке уровень грунтовых вод (УГВ) находится на 2.0 m ниже верха стены; под подошвой — линейное противодавление**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Ведомость сил; **FS_s**, **FS_o**, **e**, **q_{max}**; влияние воды.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Ведомость сил (модуль; $M = xF_z - zF_x$, опрокидывание +)

Позиция	F_x (kN/m)	F_z (kN/m)	x (m)	z (m)	M (kN·m/m)
Стена	0.00	−88.80	1.55	1.22	−137.96
Блок пятки (с γ_{sat})	0.00	−152.00	2.50	2.55	−380.00
Q_{heel} (не используется)	0.00	−20.00	2.50	4.60	−50.00
Засыпка перед стенкой	0.00	−14.69	0.51	1.00	−7.49
Распор грунта P_A	−54.68	0.00	3.50	1.64	89.71
Равнодействующая давления от пригрузки P_Q	−15.33	0.00	3.50	2.30	35.27
Давление воды с тыльной стороны	−33.16	0.00	3.50	0.87	28.74
Подъём	0.00	44.64	2.33	0.00	104.15
Сопротивление перед стенкой	23.52	0.00	0.00	0.47	−10.98

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

2 Проверки

$$N = 210.85 \text{ kN/m} \quad FS_s = \frac{116.0 + 23.5}{103.2} = \mathbf{1.352} \quad FS_o = \frac{525.5}{257.9} = \mathbf{2.038}$$

$$e = 0.481 \text{ m } (\leq B/6 = 0.583) \qquad q_{max} = 109.9 \text{ kPa} \qquad q_{min} = 10.6 \text{ kPa}$$

Вода снизила коэффициент запаса против сдвига с 2.03 → **1.35** (< 1.5 ✗), коэффициент запаса против опрокидывания с 3.81 → **2.04**, а эксцентриситет e изменила с 0.243 → 0.481 m; противодавление уменьшило N на 44.6 kN/m. **Условие по сдвигу при статической нагрузке не выполняется**: требуются дренаж, упорный зуб или более широкая подошва.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Разгрузочная консольная плита, разгружающая лицевую плиту

ТЕОРИЯ

Разгрузочная полка (консоль) — железобетонная плита, выступающая от тыльной грани лицевой плиты в засыпку; применяется на высоких стенах (момент в лицевой плите растёт с H³) или для усиления недостаточной стены. Три эффекта: (1) воспринимает грунт над собой; (2) **разгружает** лежащую под ней лицевую плиту: под полкой давление от собственного веса грунта возникает заново; (3) добавляет стене вес.

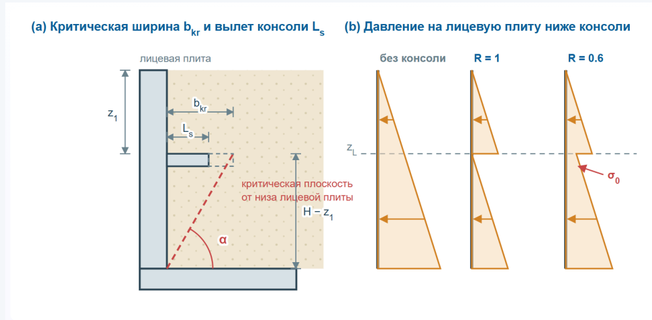
Разгрузочная полка полностью эффективна только в том случае, если её конец достигает **критической плоскости скольжения**, поднимающейся из-под тыльной грани лицевой плиты (Rankine, горизонтальная засыпка: α = 45° + φ′/2). Необходимая критическая ширина полки и коэффициент разгрузки:

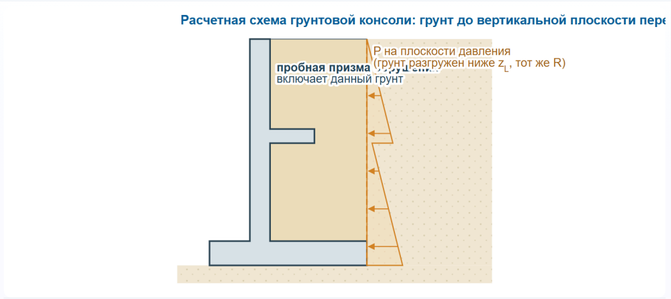
$$b_{kr} = (H - z_1)\,(\cot\alpha - \tan\beta_w) \qquad R = \min\left(\frac{L_s}{b_{kr}}, 1\right)$$

$$p(z) = K\,[\sigma'_v(z) - R\,\sigma'_v(z_L)] \qquad z > z_L \;\text{ (ниже консоли)}$$

R = 1: два отдельных треугольника (полная разгрузка); R < 1: частичная разгрузка, линейная интерполяция между стеной без разгрузочной консоли и стеной с полной разгрузкой. Разгружается только давление от статического **веса грунта**; пригрузка, вода и сейсмическая добавка не разгружаются.

Момент от нагрузки на разгрузочную полку относительно лицевой плиты лицевой плите не засчитывается (в запас); сама полка рассчитывается как отдельная консоль на собственную нагрузку (M_{root}).





Условие

ПРИМЕР

Дано

Стена и грунт	**Стена из примеров 1–4 (H = 4.0 m; статический случай); горизонтальная засыпка,** $\varphi' = 30^\circ$
Консольная	**глубина низа разгрузочной полки** $z_1 = 2.15$ **m (от верха стены), вылет** $L_s = 1.00$ **m, толщина** $t_s = 0.30$ **m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Критический угол α, критическая ширина $\mathbf{b_{kr}}$, **R**; изменение V и M в основании лицевой плиты; внешняя устойчивость.

Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Критическая плоскость и ширина (вертикальная тыловая грань: $\beta_w = 0$)

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} = 60.0^\circ \qquad b_{kr} = (4.0 - 2.15)\cot 60^\circ = 1.068 \text{ m}$$

$$R = \min(1.00/1.068,\ 1) = \mathbf{0.9362} \ \text{(частичная разгрузка)}$$

2 Усилия в основании лицевой плиты (без разгрузочной полки → с разгрузочной полкой)

$$V:\ 61.33 \rightarrow 38.99 \text{ kN/m} \ (-\%36.4)$$

$$M:\ 90.67 \rightarrow 70.00 \text{ kN·m/m} \ (-\%22.8)$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Нагрузка на консоль и внешняя устойчивость (та же разгрузка в плоскости давления)

$$W_{soil} = 43.3 \text{ kN/m}, \quad W_{self} = 7.2 \text{ kN/m}, \quad M_{root} = 25.25 \text{ kN·m/m}$$

$$FS_s: \ 2.03 \rightarrow 3.26 \qquad FS_o: \ 3.81 \rightarrow 5.28 \qquad e: \ 0.243 \rightarrow 0.094 \text{ m}$$

Разгрузочная полка (L_s = 1.00 m < b_{cr} = 1.07 m: R = 0.94) уменьшает поперечную силу в основании лицевой плиты на 36%, а момент — на 23%; нагрузка на полку и её вес передаются стене: коэффициент запаса на сдвиг FS 2.03 → 3.26, эксцентриситет 0.243 → 0.094 m. Полка, кроме того, рассчитывается на M_{root} = 25.3 kN·m/m в собственном корне.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Объём решения

ТЕОРИЯ

Внешняя устойчивость рассматривает стену как единый жёсткий блок; **усилия в сечениях** (лицевая плита, носок, пятка, разгрузочная полка, зуб) получаются по воздействиям, выдаваемым этим модулем; железобетонный расчёт (армирование, поперечная сила) выходит за рамки данной презентации.

Несвязная засыпка ($c' = 0$); один слой, горизонтальная или односкатная наклонная поверхность; уровень воды горизонтален, давление гидростатическое; пригрузка равномерно распределённая (полосовые и сосредоточенные боковые давления добавляются по Boussinesq).

Трение по подошве $\mu_b = \tan \delta_b$; адгезия отсутствует. Пассивное сопротивление спереди учитывается только при расчёте на сдвиг и не учитывается при расчёте на опрокидывание и несущую способность; при землетрясении оно вводится с $\eta_{p,E}$ (по умолчанию 0).

Псевдостатическое землетрясение: Mononobe–Okabe + инерция + гидродинамическое давление воды; при $k_v > 0$ рассматриваются также оба направления.

Разгрузочная полка и упорный зуб моделируются упрощёнными методами (полка: частичная/полная разгрузка, зуб: комбинированное пассивное давление); общая устойчивость и осадка выходят за рамки рассмотрения.

Резюме

Главное

Стена: фундаментная плита + лицевая плита (стена); $W_c = \Sigma \gamma_c A_i$; **блок пятки** и засыпка перед стеной перемещаются вместе со стеной; давление действует на вертикальной плоскости у заднего края подошвы ($h = t_f + H$); Q_{heel} не входит ни в одну проверку

Проверки по той же ведомости сил: $FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H$, $FS_o = \Sigma M_{res}/\Sigma M_{ov}$, x_R, e, $q = V/B(1 \pm 6e/B)$; если $|e| > B/6$, то $q_{max} = 2V/(3x_R)$

Землетрясение: P_{AE} (Mononobe–Okabe) + ΔP_{AE} на $0.6h$ + силы инерции $k_h W$; пример стены при землетрясении **не удовлетворяет условиям по сдвигу и эксцентриситету**, после пересмотра с более широкими носком и пяткой условия выполняются

Усилия в сечениях: лицевая плита $V = K_a(\frac{1}{2}\gamma H^2 + qH)$, $M = K_a(\gamma H^3/6 + qH^2/2)$; носок и пятка, защемлённые в грани лицевой плиты: напряжение по подошве − вес плиты и грунта

Упорный зуб: P_{key} — из комбинированного пассивного давления (при сдвиге), V, M — из K_p брутто; при землетрясении — с $\eta_{p,E}$

Разгрузочная полка: $b_{kr} = (H - z_1)(\cot \alpha - \tan \beta_w)$, $R = \min(L_s/b_{kr}, 1)$; под полкой давление от веса грунта возобновляется; вода и пригрузка не разгружаются

Вода: вес с γ_{sat} + отдельное давление воды с тыльной стороны; противодавление уменьшает N и добавляет опрокидывание (в примере проверка на сдвиг при статической нагрузке не выполняется)

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 = 4 m, q = 10 kPa, k_h = 0.15).

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

От теории к практике

В GeoTerva вводятся лицевая плита, фундаментная плита, засыпка, вода, сейсмические коэффициенты, упорный зуб и разгрузочная полка собственной стены; модуль выдаёт ведомость сил, проверки и усилия в сечениях.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне
Для пробных модулей регистрация не требуется.