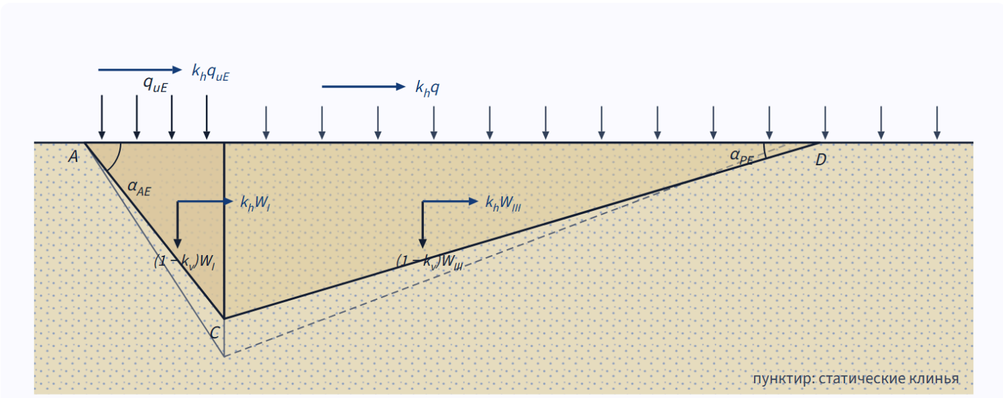
GeoTerva

Презентация лекции по геотехнике · Фундаменты

Несущая способность ленточного фундамента при сейсмическом воздействии

Лекция: от двух призм Coulomb по Richards, Elms и Budhu к статическим коэффициентам несущей способности, к коэффициентам Mononobe–Okabe при землетрясении и к тому, насколько землетрясение их снижает; по каждой теме — пример расчёта.



Две призмы Coulomb

$K_A \cdot K_P \cdot \alpha_A$

Mononobe–Okabe

$\theta = \tan^{-1} k_h/(1-k_v)$

Влияние землетрясения

Примеры расчёта

Что мы изучим на этой лекции?

- Построить механизм несущей способности ленточного фундамента **с двумя призмами Coulomb** (активная ABC, пассивная BCD)
- Определение значений $\mathbf{K_A}$, $\mathbf{K_P}$, $\boldsymbol{\alpha_A}$, $\boldsymbol{\alpha_P}$ и по ним коэффициентов $\mathbf{N_q}$, $\mathbf{N_\gamma}$, $\mathbf{N_c}$ по выражениям в замкнутой форме
- Учёт землетрясения как **псевдостатической** силы: $\theta = \tan^{-1}[k_h/(1 - k_v)]$ и коэффициенты **Mononobe–Okabe** K_{AE}, K_{PE}
- Расчёт **несущей способности основания при сейсмических воздействиях** $\mathbf{q_{uE}}$ и её отношения к статическому значению
- Интерпретация чувствительности к k_h и k_v и **предела** $\boldsymbol{\theta \geq \varphi}$
- Определение допускаемого давления по q_{uE} и **проверка** фундамента

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

Фундамент начального примера — модель, с которой открывается модуль: ленточный фундамент шириной 1.5 m, D_f = 1 m, c = 30 kPa, φ' = 25°, γ = 17 kN/m³, k_h = 0.25.

Две призмы Coulomb вместо логарифмической спирали

ТЕОРИЯ

Richards, Elms и Budhu (1993) предложили для ленточного фундамента теорию, **применимую также к сейсмическому нагружению**. Вместо логарифмической спирали Terzaghi или Meyerhof она использует простую поверхность разрушения из **двух призм Coulomb**; поэтому каждый коэффициент получается **в замкнутом виде**.

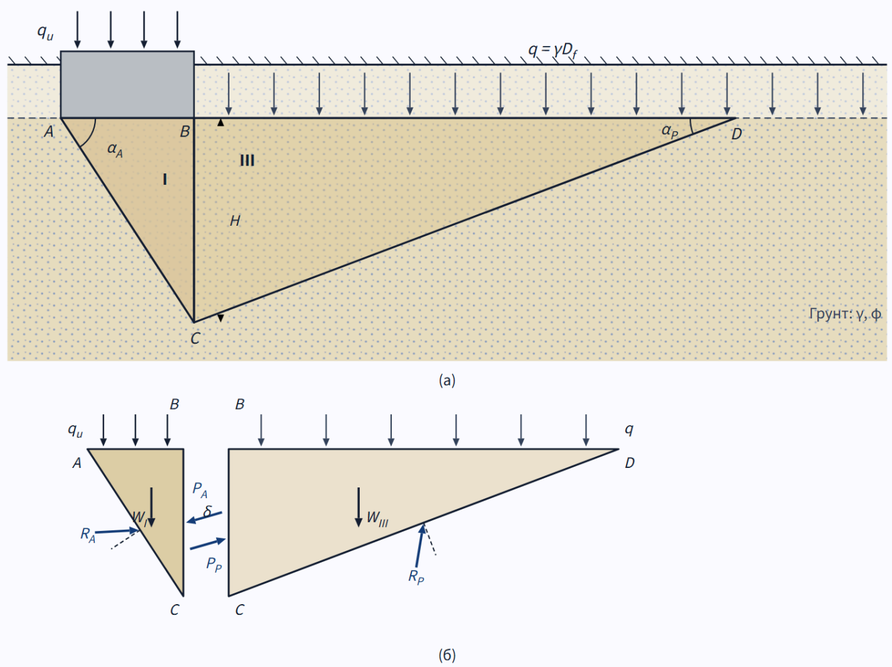
Ленточный фундамент, ширина B, глубина D_f; грунт выше подошвы действует только как пригрузка $q = \gamma D_f$.

c–φ грунт, $\varphi > 0$; в зоне разрушения подземных вод нет.

Землетрясение: **псевдостатическая массовая сила**; горизонтальный и вертикальный коэффициенты k_h, k_v действуют на призмы и нагрузки.

Трение о стенку $\delta = \varphi/2$ на вертикальной границе между двумя призмами (рекомендация авторов).

Призма под фундаментом **активная** (ABC), рядом с ним — **пассивная** (BCD); они встречаются на грани BC (высота H).



Углы призмы и коэффициенты Coulomb

ТЕОРИЯ

Наклоны призм αA и αP — углы **критических призм Coulomb** (отсчитываются от горизонтали):

$$\alpha_A = \varphi + \tan^{-1}\left\{\frac{[\tan\varphi(\tan\varphi+\cot\varphi)(1+\tan\delta\cot\varphi)]^{0.5}-\tan\varphi}{1+\tan\delta(\tan\varphi+\cot\varphi)}\right\}$$

$$\alpha_P = -\varphi + \tan^{-1}\left\{\frac{[\tan\varphi(\tan\varphi+\cot\varphi)(1+\tan\delta\cot\varphi)]^{0.5}+\tan\varphi}{1+\tan\delta(\tan\varphi+\cot\varphi)}\right\}$$

Горизонтальные составляющие сил Coulomb записываются через следующие коэффициенты:

$$K_A = \frac{\cos^2\varphi}{\cos\delta\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}}\right]^2} \qquad K_P = \frac{\cos^2\varphi}{\cos\delta\left[1-\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}}\right]^2}$$

ОБОЗНАЧЕНИЯ

δ = φ/2: трение по условной стенке между призмами

α_A: угол наклонной плоскости AC к горизонту

α_P: угол наклонной плоскости CD к горизонту

P_A, P_P: силы Coulomb на грани BC

R_A, R_P: равнодействующие на наклонных плоскостях

W_I, W_{III}: веса призм

Условие

ПРИМЕР

Дано

Грунт	$\varphi' = 25^\circ$ **(начальная модель модуля)**
Трение грунта о стенку	$\delta = \varphi/2 = 12.5^\circ$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить коэффициенты K_A, K_P и углы наклона призм α_A, α_P.

Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 Общее подкоренное выражение (sin 37.5° = 0.6088; sin 25° = 0.4226; cos 12.5° = 0.9763)

$$\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} = \sqrt{\frac{0.6088\cdot 0.4226}{0.9763}} = \mathbf{0.5133}$$

2 K_A и K_P ($\cos^2 25° = 0.8214$)

$$K_A = \frac{0.8214}{0.9763(1+0.5133)^2} = \mathbf{0.3674} \qquad K_P = \frac{0.8214}{0.9763(1-0.5133)^2} = \mathbf{3.5524}$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Подкоренное выражение (tan φ = 0.4663; cot φ = 2.1445; tan δ = 0.2217)

$$[\tan\varphi(\tan\varphi+\cot\varphi)(1+\tan\delta\cot\varphi)]^{0.5}=[0.4663(2.6108)(1.4754)]^{0.5}=1.3402$$

$$1+\tan\delta(\tan\varphi+\cot\varphi)=1.5788$$

4 Углы призмы

$$\alpha_A=25^\circ+\tan^{-1}\frac{1.3402-0.4663}{1.5788}=25^\circ+28.97^\circ=\mathbf{53.97}^\circ$$

$$\alpha_P=-25^\circ+\tan^{-1}\frac{1.3402+0.4663}{1.5788}=-25^\circ+48.85^\circ=\mathbf{23.85}^\circ$$

Активный клин крутой (α_A = 53.97°), пассивный клин пологий (α_P = 23.85°). Высота клина $H = B\tan\alpha_A = 1.5\times1.375 =$ **2.06 m**.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Горизонтальное равновесие на грани BC

ТЕОРИЯ

Рассмотрим только пригрузку (φ ≠ 0, γ = 0, q ≠ 0); пусть давление под фундаментом равно q'_u. На грани BC горизонтальные силы уравновешены:

$$P_A \cos\delta = P_P \cos\delta$$

При равномерной пригрузке каждая сила равна коэффициенту давления × пригрузка × H: q'_u на активной стороне, q на пассивной:

$$P_A \cos\delta = q'_u K_A H \qquad P_P \cos\delta = q\, K_P H$$

При их приравнивании H сокращается, и **N_q** становится отношением двух коэффициентов Coulomb:

$$q'_u = q\,\frac{K_P}{K_A} = q\,N_q \qquad N_q = \frac{K_P}{K_A}$$

NEDEN ORAN?

Активная призма под фундаментом выталкивает в сторону соседнюю пассивную призму. Обе стороны упираются друг в друга на одной высоте H и при одном и том же δ; поэтому равновесие определяется только **отношением** двух сопротивлений грунта.

Вес призм вводится через H = B tan α_A

ТЕОРИЯ

Рассмотрим теперь только вес (φ ≠ 0, γ ≠ 0, q = 0); давление под подошвой фундамента q''_u. На активной стороне это давление прикладывается сверх веса подобно пригрузке, на пассивной стороне действует только вес:

$$P_A \cos\delta = q''_u H K_A + \tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_A \qquad P_P \cos\delta = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_P$$

При приравнивании:

$$q''_u = \tfrac{1}{2}\gamma H \left(\frac{K_P}{K_A} - 1\right)$$

Высота грани определяется активной призмой, H = B tan α_A; отсюда получается **N_γ**:

$$q''_u = \tfrac{1}{2}\gamma B\, N_\gamma \qquad N_\gamma = \tan\alpha_A \left(\frac{K_P}{K_A} - 1\right)$$

КОММЕНТАРИЙ

N_γ зависит от глубины призмы: множитель **tan α_A** показывает, насколько крута призма. Крутая призма (большой α_A) уходит глубже, и член, учитывающий собственный вес, возрастает.

Суперпозиция и N_c

ТЕОРИЯ

Слагаемые от пригрузки и веса суммируются (суперпозиция):

$$q_u = q'_u + q''_u = q\,N_q + \tfrac{1}{2}\gamma B\,N_\gamma$$

Для сцепления при φ = 0 анализ призмы Coulomb даёт $N_c = 6$; авторы для краткости используют известное соотношение:

$$N_c = (N_q - 1)\cot\varphi \qquad q_u = c\,N_c + q\,N_q + \tfrac{1}{2}\gamma B\,N_\gamma$$

Это **статическое** значение — несущая способность этих двух призм; оно **отличается** от коэффициентов типа Prandtl y Terzaghi, Meyerhof, Hansen или Vesic (φ = 25°: N_q = 9.67; Prandtl–Reissner 10.66).

Несущая способность основания при сейсмических воздействиях определяется путём **снижения** этого значения; модуль выводит оба значения рядом.

СТАТИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ (δ = φ/2)

φ′	δ	α_A	N_q	N_γ	N_c
5	2.5	42.22	1.53	0.49	6.11
10	5.0	45.19	2.37	1.38	7.77
15	7.5	48.13	3.70	3.02	10.09
20	10.0	51.06	5.90	6.06	13.46
25	12.5	53.97	9.67	11.92	18.59
30	15.0	56.86	16.51	23.76	26.86
35	17.5	59.74	29.89	49.52	41.26
40	20.0	62.60	59.03	111.96	69.16
45	22.5	65.45	133.87	290.89	132.87

Условие

ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**ленточный (непрерывный) фундамент, B = 1.5 m, глубина подошвы D_f = 1.0 m**
Грунт	$c = 30$ kPa, $\varphi' = 25^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17$ kN/m^3**; УГВ вне зоны разрушения**
Предыдущий пример	$K_A = 0.3674,\ K_P = 3.5524,\ \alpha_A = 53.97^\circ$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить значения N_q, N_γ, N_c и статического q_u.

Решение

РЕШЕНИЕ

1 Коэффициенты несущей способности (tan 53.97° = 1.3748)

$$N_q = \frac{K_P}{K_A} = \frac{3.5524}{0.3674} = \mathbf{9.67} \qquad N_c = \frac{9.67 - 1}{0.4663} = \mathbf{18.59}$$

$$N_\gamma = 1.3748(9.67 - 1) = \mathbf{11.92}$$

2 Статическая несущая способность ($q = \gamma D_f$ = 17 kPa)

$$q_u = 30(18.59) + 17(9.67) + \tfrac{1}{2}(17)(1.5)(11.92)$$

$$= 557.8 + 164.4 + 152.0 = \mathbf{874.14}\ \text{kPa}$$

Статическая несущая способность **874.14 kPa**; слагаемое от сцепления 64%, от пригрузки 19%, от собственного веса 17%. Землетрясение уменьшит это значение (следующий раздел).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Угол θ и коэффициенты Mononobe–Okabe

ТЕОРИЯ

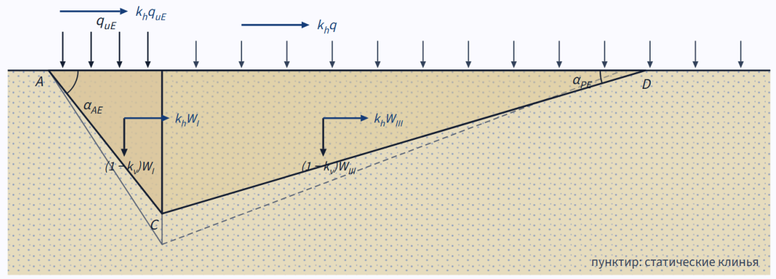
При сейсмическом воздействии те же две призмы рассчитываются **с псевдостатическими инерционными силами**. Равнодействующая веса и инерционной силы отклоняется от вертикали на угол θ; призмы рассчитываются с α = φ − θ вместо φ:

$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad \alpha = \varphi - \theta$$

Коэффициенты Coulomb превращаются в коэффициенты **Mononobe–Okabe**:

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

$$K_{PE} = \frac{\cos^2(\varphi-\theta)}{\cos\theta\cos(\delta+\theta)\left[1-\sqrt{\dfrac{\sin(\varphi+\delta)\sin(\varphi-\theta)}{\cos(\delta+\theta)}}\right]^2}$$



При θ = 0 любое сейсмическое выражение приводится к статической форме: $K_{AE} = K_A$, $K_{PE} = K_P$.

С ростом горизонтального ускорения α уменьшается: призмы становятся более пологими, механизм — менее глубоким.

Условие

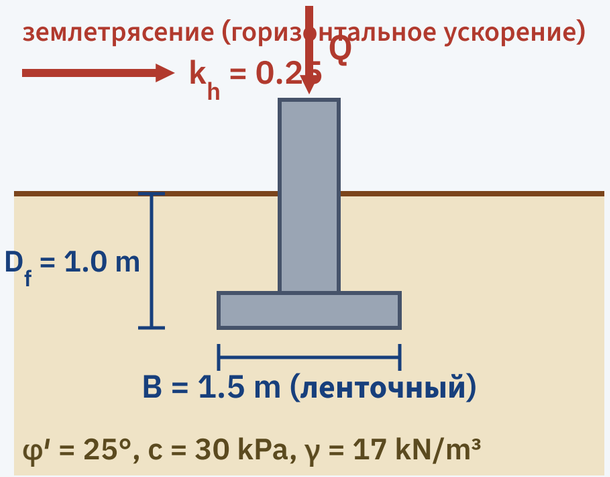
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**ленточный (непрерывный) фундамент, B = 1.5 m, глубина подошвы D_f = 1.0 m**
Грунт	$c = 30$ kPa, $\varphi' = 25^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17$ kN/m^3; **УГВ вне зоны разрушения**
Землетрясение	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Трение грунта о стенку	$\delta = 12.5^\circ$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить **θ**, α = φ − θ и значения **K_{AE}, K_{PE}**.



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Угол наклона и корневое слагаемое (sin 37.5° = 0.6088; sin α = 0.1901; cos(δ + θ) = cos 26.54° = 0.8945)

$$\theta = \tan^{-1}\frac{0.25}{1-0} = \mathbf{14.04}^\circ \qquad \alpha = \varphi - \theta = 10.96^\circ$$

$$\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\alpha}{\cos(\delta+\theta)}} = \sqrt{\frac{0.6088\cdot 0.1902}{0.8947}} = \mathbf{0.3597}$$

2 K_{AE} и K_{PE} ($\cos^2\alpha = 0.9638$; $\cos\theta = 0.9701$)

$$K_{AE} = \frac{0.9638}{0.9701(0.8947)(1+0.3597)^2} = \mathbf{0.6006}$$

$$K_{PE} = \frac{0.9638}{0.9701(0.8947)(1-0.3597)^2} = \mathbf{2.7089}$$

Землетрясение **увеличивает** K_A: 0.367 → 0.601, и **уменьшает** K_P: 3.552 → 2.709.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Углы призм, коэффициенты и q_{uE}

ТЕОРИЯ

$$\alpha_{AE} = \alpha + \tan^{-1}\left\{\frac{\sqrt{(1+\tan^2\alpha)\,[1+\tan(\delta+\theta)\cot\alpha]} - \tan\alpha}{1+\tan(\delta+\theta)(\tan\alpha+\cot\alpha)}\right\}$$

$$\alpha_{PE} = -\alpha + \tan^{-1}\left\{\frac{\sqrt{(1+\tan^2\alpha)\,[1+\tan(\delta-\theta)\cot\alpha]} + \tan\alpha}{1+\tan(\delta+\theta)(\tan\alpha+\cot\alpha)}\right\}$$

Поскольку равновесие то же, коэффициенты сохраняют ту же форму:

$$N_{qE} = \frac{K_{PE}}{K_{AE}} \qquad N_{\gamma E} = \tan\alpha_{AE}\left(\frac{K_{PE}}{K_{AE}} - 1\right) \qquad N_{cE} \approx (N_{qE}-1)\cot\varphi$$

$$q_{uE} = c\,N_{cE} + q\,N_{qE} + \tfrac{1}{2}\gamma B\,N_{\gamma E}$$

ПРИМЕЧАНИЕ

Для N_{cE} статическое соотношение **переносится** на сейсмический случай (авторы записывают теорию для несвязного грунта). При c > 0 модуль сообщает об этом как о допущении и приводит оценку чувствительности для c = 0.

Условие

ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**ленточный (непрерывный) фундамент, B = 1.5 m, глубина подошвы D_f = 1.0 m**
Грунт	$c = 30$ kPa, $\varphi' = 25^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17$ kN/m^3**; УГВ вне зоны разрушения**
Землетрясение	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Предыдущий пример	$\theta = 14.04^\circ$, $K_{AE} = 0.6006$, $K_{PE} = 2.7089$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Найти **α_{AE}, N_{qE}, $N_{\gamma E}$, N_{cE}** и их отношения к статическим коэффициентам.

Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

1 α = 10.96°: tan α = 0.1937, cot α = 5.1620, tan(δ + θ) = tan 26.54° = 0.4994

$$\sqrt{(1+\tan^2\alpha)(1+\tan(\delta+\theta)\cot\alpha)} = \sqrt{1.0375(3.5777)} = 1.9267$$

$$1+\tan(\delta+\theta)(\tan\alpha+\cot\alpha) = 3.6745$$

2 Угол призмы обрушения при землетрясении (статический α_A = 53.97°)

$$\alpha_{AE} = 10.96^\circ + \tan^{-1}\frac{1.9267-0.1937}{3.6745} = 10.96^\circ + 25.25^\circ = \mathbf{36.21}^\circ$$

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

3 Коэффициенты несущей способности основания при сейсмических воздействиях (tan α_{AE} = 0.7322)

$$N_{qE} = \frac{2.7089}{0.6006} = \mathbf{4.51} \qquad N_{\gamma E} = 0.7322(4.51 - 1) = \mathbf{2.57} \qquad N_{cE} = \frac{4.51 - 1}{0.4663} = \mathbf{7.53}$$

	N_q	N_γ	N_c
статический	9.67	11.92	18.59
землетрясение (k_h = 0.25)	4.51	2.57	7.53
отношение	**0.466**	**0.216**	**0.405**

Землетрясение **сильнее всего** снижает слагаемое собственного веса ($N_{\gamma E}$ составляет лишь 22% статического значения); N_{qE} и N_{cE} сохраняют около половины.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

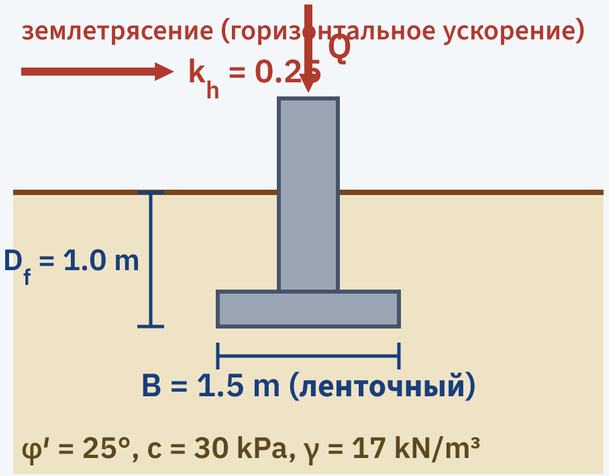
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**ленточный (непрерывный) фундамент, B = 1.5 m, глубина подошвы D_f = 1.0 m**
Грунт	$c = 30$ kPa, $\varphi' = 25^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17$ kN/m^3**; УГВ вне зоны разрушения**
Землетрясение	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Безопасность	**FS = 3**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

q_{uE}, его отношение к статическому q_u, **q_{all}** брутто и нетто и допускаемая нагрузка **Q_{all}** (на единицу длины).



Решение

РЕШЕНИЕ

1 Несущая способность при сейсмических воздействиях (q = 17 kPa)

$$q_{uE} = 30(7.53) + 17(4.51) + \tfrac{1}{2}(17)(1.5)(2.57)$$
$$= 225.83 + 76.67 + 32.77 = \mathbf{335.28}\ \text{kPa}$$

2 Допустимое давление и нагрузка

$$q_{all,g} = \frac{335.28}{3} = \mathbf{111.76}\ \text{kPa} \qquad q_{all,n} = \frac{335.28 - 17}{3} = 106.09\ \text{kPa}$$

$$Q_{all} = q_{all,g}\, B = 111.76(1.5) = \mathbf{167.6}\ \text{kN/m}$$

Землетрясение снижает несущую способность с **874.14 kPa** до **335.28 kPa**, т. е. до **38%** статического значения (модуль приводит рядом и статическое q_u). Допускаемые давления принимаются по q_{uE}.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Насколько землетрясение уменьшает значение и где предел?

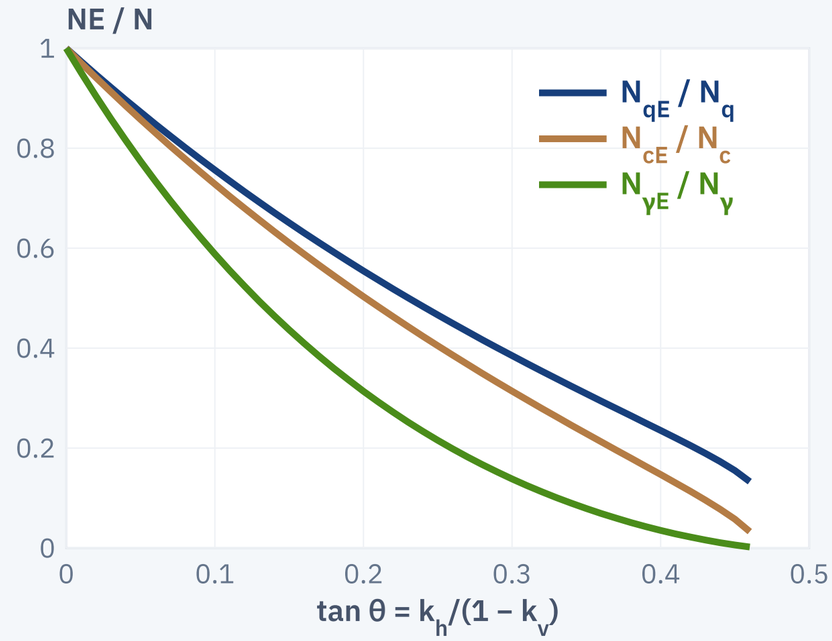
ТЕОРИЯ

В источнике снижения приведены на графиках Richards и др. (1993); на странице они строятся по замкнутым выражениям (сбоку). **Сильнее всего уменьшается член собственного веса**: при tan θ = 0.2 значение $N_{\gamma E}$ составляет около одной трети статического; N_{qE} и N_{cE} остаются примерно на уровне половины.

При θ → φ угол α = φ − θ → 0: активная призма становится пологой, и все три коэффициента стремятся к нулю; у фрикционного грунта не остаётся запаса сопротивления горизонтальному ускорению.

Теория справедлива только при $\mathbf{k_h/(1 - k_v) < \tan \varphi}$; при θ ≥ φ модуль **прекращает расчёт**. Это отношение является также тем, при котором, согласно теории, начинается сейсмическая осадка.

При приближении θ к φ′ (θ > 0.85φ) модуль выдаёт предупреждение: это не расчётная несущая способность, а предел применимости метода.



Построено по выражениям в замкнутом виде для φ′ = 25°, δ = φ/2.

Условие

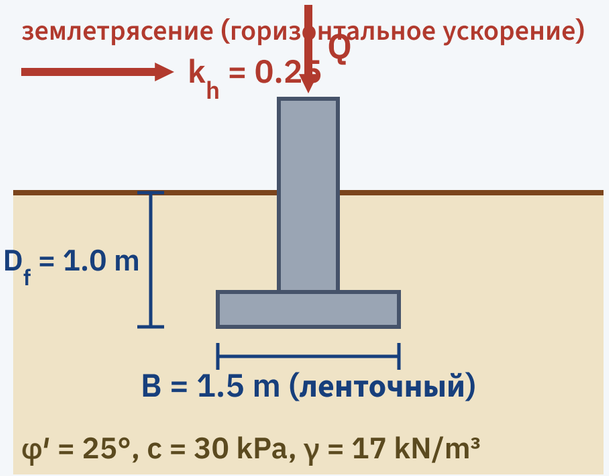
ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**ленточный (непрерывный) фундамент, B = 1.5 m, глубина подошвы D_f = 1.0 m**
Грунт	$c = 30$ kPa, $\varphi' = 25^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17$ kN/m^3**; УГВ вне зоны разрушения**
Землетрясение	**k_v = 0; k_h = 0, 0.05, … 0.45**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Для каждого k_h найти **θ, N_{qE}, $N_{\gamma E}$, N_{cE}, q_{uE}** и q_{uE}/q_u; вычислить предельное значение k_h, при котором модуль останавливается.



Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

k_h	θ (°)	N_{qE}	$N_{\gamma E}$	N_{cE}	q_{uE} (kPa)	q_{uE}/q_u
0.00	0.0	9.67	11.92	18.59	**874**	%100
0.05	2.9	8.44	9.23	15.94	**739**	%85
0.10	5.7	7.31	7.01	13.54	**620**	%71
0.15	8.5	6.29	5.20	11.35	**514**	%59
0.20	11.3	5.36	3.74	9.36	**420**	%48
0.25	14.0	4.51	2.57	7.53	**335**	%38
0.30	16.7	3.72	1.65	5.84	**260**	%30
0.35	19.3	2.99	0.94	4.26	**191**	%22
0.40	21.8	2.28	0.42	2.74	**126**	%14
0.45	24.2	1.50	0.07	1.07	**59**	%7

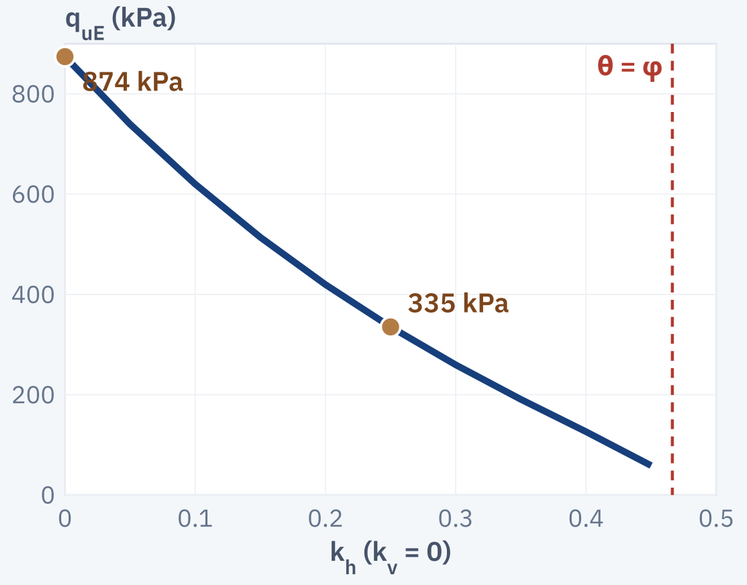
Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

1 Предел применимости: θ < φ

$$\frac{k_h}{1-k_v} < \tan\varphi \;\Rightarrow\; k_{h,\max} = (1-k_v)\tan 25^\circ = \mathbf{0.4663}$$

При k_h = 0.25 величина q_{uE} составляет 38 % от статической; **при k_h = 0.45 — лишь 7 %**. Если ввести k_h = 0.47, модуль останавливается (θ ≥ φ). Кривая вначале падает круто: **даже малые ускорения** вызывают большую потерю (k_h = 0.05 → 85 %).



Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**ленточный (непрерывный) фундамент, B = 1.5 m, глубина подошвы D_f = 1.0 m**
Грунт	$c = 30$ kPa, $\varphi' = 25^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17$ kN/m^3**; УГВ вне зоны разрушения**
Землетрясение	**k_h = 0.25; k_v = 0, 0.1, 0.2, 0.3**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Для каждого k_v определить значения **θ** и **q_{uE}**.

Решение

РЕШЕНИЕ

1 $\theta = \tan^{-1}[k_h/(1 - k_v)]$; пример: $k_v = 0.2$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{0.25}{1-0.2} = \tan^{-1}(0.3125) = \mathbf{17.35}^\circ$$

k_v	θ (°)	N_{qE}	$N_{\gamma E}$	N_{cE}	q_{uE} (kPa)	q_{uE}/q_u
0.0	14.04	4.51	2.57	7.53	**335**	%38
0.1	15.52	4.07	2.03	6.57	**292**	%33
0.2	17.35	3.54	1.45	5.44	**242**	%28
0.3	19.65	2.88	0.86	4.04	**181**	%21

С ростом k_V множитель $(1 - k_V)$ уменьшается, θ растёт, а q_{uE} снижается: при $k_V = 0.2$ значение q_{uE} уменьшается с 335 до 242 kPa (на 28 %). Пренебрежение вертикальным ускорением остаётся **в небезопасную сторону**.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Допустимое давление по несущей способности при сейсмических воздействиях

ТЕОРИЯ

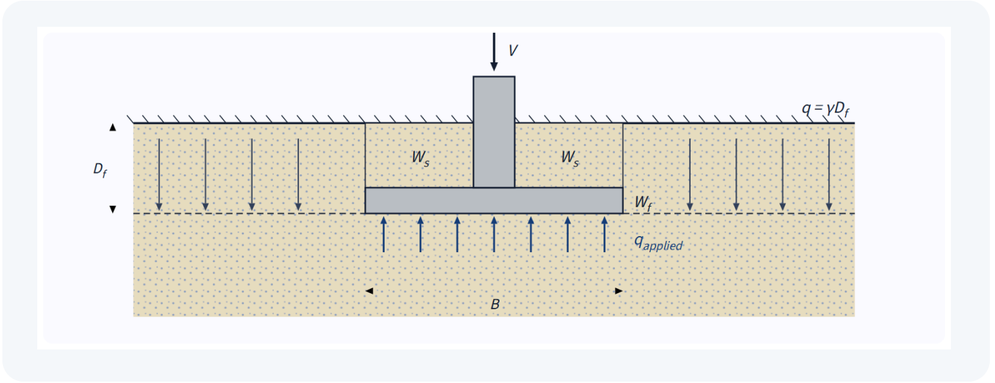
Модуль определяет допускаемые давления по **несущей способности основания при сейсмических воздействиях q_{uE}**; давления брутто и нетто он разделяет, а статическое q_u приводит рядом:

$$q_{u,net} = q_{uE} - q \qquad q_{all,g} = \frac{q_{uE}}{FS} \qquad q_{all,n} = \frac{q_{u,net}}{FS}$$

Приложенное давление q_{app} — это **вертикальное давление брутто на подошве** при сейсмическом сочетании нагрузок (V/B; нагрузка от колонны + фундамент + вес грунта). Фундамент проходит проверку при выполнении следующих условий:

$$q_{apply} \le q_{all,g} \quad (FS_{\text{фактический}} = q_{uE}/q_{apply}) \qquad q_{apply} - q \le q_{all,n}$$

Допускаемая нагрузка на единицу длины $Q_{all} = q_{all,g}$ B. Горизонтальная сейсмическая инерция уже учитывается через k_h; независимые горизонтальная сила, момент или эксцентриситет **выходят за рамки** данного расчёта.



Условие

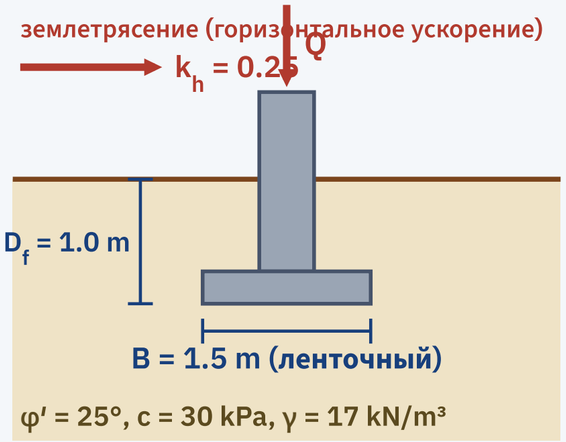
ПРИМЕР

Дано

Результат (Пример 5)	**q_{uE} = 335.28 kPa; q = 17 kPa; FS = 3**
Приложенное давление	**в случае сейсмического нагружения (a) q_{app} = 100 kPa · (b) q_{app} = 150 kPa**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

В каждом случае следует проверять три условия (брутто, FS_{actual}, нетто).



Решение

РЕШЕНИЕ

1 (a) q_{appl} = 100 kPa

$$100 \le q_{all,g} = 111.76 \;\Rightarrow\; \textbf{выполняется} \qquad FS_{\text{фактический}} = \frac{335.28}{100} = \mathbf{3.35} \ge 3$$

$$100 - 17 = 83 \le q_{all,n} = 106.09 \;\Rightarrow\; \textbf{выполняется}$$

2 (b) q_{appl} = 150 kPa

$$150 > q_{all,g} = 111.76 \;\Rightarrow\; \textbf{не выполняется} \qquad FS_{\text{фактический}} = \frac{335.28}{150} = \mathbf{2.24} < 3$$

$$150 - 17 = 133 > q_{all,n} = 106.09 \;\Rightarrow\; \textbf{не выполняется}$$

При сейсмической нагрузке условию удовлетворяет только фундамент с **q_{app} ≤ 111.8 kPa**. Тот же фундамент в статических условиях воспринимал бы нагрузку до 291 kPa ($q_{all,g}$ = 291.4).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

ПРИМЕР

Дано

Фундамент	**ленточный (непрерывный) фундамент, B = 1.5 m, глубина подошвы D_f = 1.0 m**
Грунт	$c = 30$ kPa, $\varphi' = 25^\circ$
Удельный вес	$\gamma = 17$ kN/m^3**; УГВ вне зоны разрушения**
Землетрясение	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Сравнение	**c = 30 kPa и c = 0**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Определить статическую и сейсмическую несущую способность для c = 30 и c = 0; прокомментировать долю слагаемых сцепления.

Решение

РЕШЕНИЕ

	$c\,N_c$	$q\,N_q$	$\frac{1}{2}\gamma B\,N_\gamma$	итого
статика, c = 30	557.8	164.4	152.0	**874.1**
землетрясение, c = 30	225.8	76.7	32.8	**335.3**
статика, c = 0	0	164.4	152.0	**316.4**
землетрясение, c = 0	0	76.7	32.8	**109.4**

При землетрясении член со сцеплением составляет **67 %** от q_{uE}; допущение $N_{cE} = (N_{qE} - 1)\cot\varphi$ заметно влияет на результат. В порядке консервативной оценки чувствительности при c = 0 получаем q_{uE} = **109.4 kPa** (при c = 30 — 335.3 kPa).

Проверить решение в GeoTerva ↗

Резюме

Главное

Две призмы Coulomb (активная ABC, пассивная BCD) с трением о стенку $\delta = \varphi/2$ между ними; $H = B \tan \alpha_A$; каждый коэффициент в замкнутом виде

Статика: $N_q = K_P/K_A$, $N_\gamma = \tan \alpha_A(K_P/K_A - 1)$, $N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$; $q_u = cN_c + qN_q + \tfrac{1}{2}\gamma BN_\gamma$ (пример: 874.14 kPa)

Землетрясение: $\theta = \tan^{-1}[k_h/(1 - k_v)]$, $\alpha = \varphi - \theta$; K_{AE}, K_{PE} по Mononobe–Okabe; N_{qE}, $N_{\gamma E}$, N_{cE} аналогично; q_{uE} = 335.28 kPa (38% от статического значения)

Слагаемое собственного веса уменьшается сильнее всего ($N_{\gamma E}/N_\gamma = 0.22$); N_{qE} и N_{cE} сохраняют около половины

Ограничение: $k_h/(1 - k_v) < \tan \varphi$; при $\theta \geq \varphi$ модуль прекращает расчёт, при $\theta > 0.85\varphi$ выдаётся предупреждение; если k_v не учитывать, результат оказывается небезопасным

Проверка: допускаемое давление по q_{uE}; $q_{appl} \leq q_{all,g}$, FS_{actual} и нетто; $Q_{all} = q_{all,g}\, B$

Список литературы

Richards, R., Elms, D.G. and Budhu, M. (1993). Seismic bearing capacity and settlements of foundations. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 119(4), 662–674.

Das, B.M. (2017). Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement, 3rd ed. CRC Press — Раздел 6.3.1; порядок вывода на этой странице соответствует указанному источнику.

Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929). On the determination of earth pressures during earthquakes. Proc. 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).

Рисунки построены в масштабе по уравнениям, приведенным на этой странице.

ПРИМЕЧАНИЕ

Часть рисунков взята со страницы теории GeoTerva; все числовые примеры получены с помощью собственной расчётной библиотеки модуля, и модуль даёт те же значения.

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

От теории к практике

Рассчитать фундамент из примера этой презентации в GeoTerva шаг за шагом: модуль открывается с этой моделью.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне
Для пробных модулей регистрация не требуется.