

УДК 624.137.5.012.45:624.154

М.П. Дубровский, Ю.Ф. Суходоев, А.А. Стехун

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДПОРНОЙ СТЕНЫ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

Рассмотрена расчетная схема воздействия на подпорную стену, состоящего из собственного веса грунта и давления воды, а также фиксированной сплошной равномерно распределенной нагрузки. Конструкция, воспринимающая указанные нагрузки, представляет собой уголковую консольную подпорную стену, опирающуюся на сваи. Предложен расчет устойчивости положения стены против сдвига и несущей способности свай. Расчет свай ведется с использованием схемы свайного фундамента по формулам внецентренного сжатия.

Ключевые слова: тонкостенная уголковая подпорная стена, слабые грунты, устойчивость, сваи.

Розглянуто розрахункову схему впливів на підпірну стіну, що складається з власної ваги ґрунту і тиску води, а також фіксованої суцільної рівномірно до розподіленого навантаження. Конструкція, яка сприймає зазначені навантаження, являє собою куткову консольну підпірну стіну, що спирається на палі. Запропоновано розрахунок стійкості положення стіни проти зсуву і несучої здатності палей. Розрахунок палей ведеться з використанням схеми пального фундаменту за формулами позацентрального стиснення.

Ключові слова: тонкостінна куткова підпірна стіна, слабкі ґрунти, стійкість, палі.

The design scheme of the effects on the retaining wall consisting of the self-weight of the soil and the water pressure, as well as a fixed continuous uniformly distributed load, is considered. The construction that perceives these loads is an L-shape retaining wall supported by piles. The calculation of the stability of the position of the wall against shear and the bearing capacity of the piles is proposed. Eccentric compression formulas for the pile foundation scheme are applied to provide piles calculation.

Keywords: L-shape retaining wall, weak soils, stability, piles.

Вступление. Основным в расчете подпорных стен является определение величины и направления приложенного к ним давления. При расчетах по несущей способности (первая группа предельных состояний) выполняется проверка на устойчивость положения стены против сдвига и прочность грунтового основания.

© Дубровский М.П., Суходоев Ю.Ф., Стехун А.А., 2017

Постановка задачі. Рассмотреть возможность использования при проектировании подпорных стен расчетной схемы с учетом применения свай, расположенных с переменным шагом между ними.

Основные результаты.

1. Сдвигающая сила F_{sa} определяется по формуле

$$F_{sa} = F_{sa,\gamma} + F_{sa,q},$$

где $F_{sa,\gamma}$ – сдвигающая сила от собственного веса грунта равная $F_{sa,\gamma} = P_\gamma \cdot \frac{h}{2}$; $F_{sa,q}$ – сдвигающая сила от нагрузки, расположенной на поверхности призмы обрушения, равная $F_{sa,q} = P_q \cdot h$.

2. Сумма моментов M_0 всех вертикальных и горизонтальных сил относительно оси, проходящей через центр тяжести подошвы для уголко-вых стен (при $\varepsilon \leq \theta_0$) определяется по формулам (рис. 1)

$$M_0 = F_{sa} \left[h^* - \operatorname{tg}(\varepsilon + \varphi') \left(\frac{b}{2} - h^* \cdot \operatorname{tg} \varepsilon \right) \right] + \frac{1}{12} \gamma_1 \cdot \gamma_f (b-t) \cdot [h(b-4t) + 6td],$$

где γ_f – коэффициент надежности по нагрузке, принимается равным 1,2;

h^* – расстояние от равнодействующей сдвигающей силы до низа подошвы стены $h^* = \frac{1}{F_{sa}} \cdot h \cdot \left[\frac{1}{3} F_{sa,\gamma} + \frac{1}{2} \cdot F_{sa,q} \right]$.

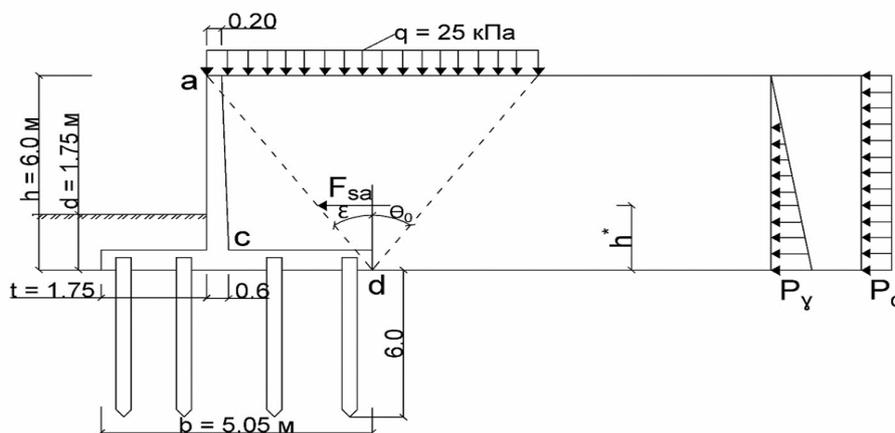


Рис. 1. Расчетная схема подпорной стены на сваях

3. Интенсивность горизонтального активного давления грунта от собственного веса P на глубине y следует определять по формуле

$$P_y = \frac{y}{h} [\gamma \cdot \gamma_f \cdot h \cdot \lambda - c \cdot (K_1 + K_2)],$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий сцепление грунта по плоскости скольжения призмы обрушения, наклоненной под углом θ_0 к вертикали;

K_2 – коэффициент, учитывающий сцепление грунта по плоскости, наклоненной под углом ε к вертикали

$$K_1 = \frac{2\lambda \cdot \cos \theta_0 \cdot \cos \varepsilon}{\sin(\theta_0 + \varepsilon)};$$
$$K_2 = \frac{\lambda \cdot \sin(\theta_0 - \varepsilon) \cdot \cos(\theta_0 + \rho)}{\sin \theta_0 \cdot \cos(\rho - \varepsilon) \cdot \sin(\theta_0 + \varepsilon)} + \operatorname{tg} \varepsilon,$$

где ε – угол наклона расчетной плоскости к вертикали; ρ – угол наклона поверхности засыпки к горизонту; θ_0 – угол наклона плоскости скольжения к вертикали; λ – коэффициент горизонтального давления грунта. При отсутствии сцепления грунта по стене $K_2 = 0$.

4. Коэффициент горизонтального давления грунта определяется по формуле

$$\lambda = \left[\frac{\cos(\varphi - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \rho)}{\cos(\varepsilon + \delta) \cdot \cos(\varepsilon - \rho)}} \right) \right]^2,$$

где δ – угол трения грунта на контакте с расчетной плоскостью (для гладкой $\delta = 0$, шероховатой $\delta = 0,5\rho$). Значения коэффициента λ приведены в приложении 2 из [3].

5. Угол наклона плоскости скольжения к вертикали θ_0 определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{\cos \rho - \eta \cos \varphi}{\sin \rho - \eta \sin \varphi},$$

где $\eta = \frac{\cos(\varepsilon - \rho)}{\sqrt{\lambda} \cdot \cos \varepsilon}$.

6. При горизонтальной поверхности засыпки $\rho = 0$, при вертикальной стене $\varepsilon = 0$ и при отсутствии трения и сцепления со стеной $\delta = 0$, $K_2 = 0$, коэффициент бокового давления грунта λ , коэффициент

интенсивности сил сцепления K_1 и угол наклона плоскости скольжения θ_0 определяются по формулам

$$\begin{cases} \lambda = \operatorname{tg}^2 \theta_0; \\ K_1 = 2\sqrt{\lambda}; \\ \theta_0 = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}. \end{cases}$$

При $\rho = 0$, $\delta \neq 0$, $\varepsilon \neq 0$ значение угла наклона плоскости скольжения к вертикали θ_0 определяется из условия

$$\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{\cos \varphi - \sqrt{\lambda}}{\sin \varphi}.$$

7. Интенсивность дополнительного горизонтального давления грунта, обусловленного наличием грунтовых вод P_w , кПа, на расстоянии y_w от верхнего уровня грунтовых вод (рис. 2) определяется по формуле

$$P_w = y_w \cdot \gamma_f \cdot \left(10 - \lambda \cdot \gamma + \frac{16,5\lambda}{1+e} \right),$$

где e – пористость грунта;

γ_f – коэффициент надежности по нагрузке принимается равным 1,1.

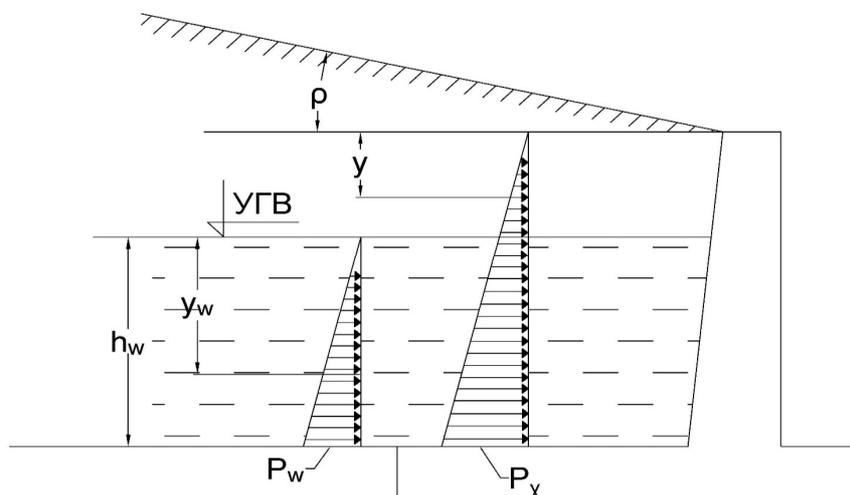


Рис. 2. Схема давления грунта на подпорную стену от собственного веса и давления воды

8. Интенсивность горизонтального давления грунта от равномерно распределенной нагрузки q (при ее сплошном и фиксированном расположении) на поверхности призмы обрушения следует определять по формуле

$$P_q = q \cdot \gamma_f \cdot \lambda.$$

Расчет подпорных стен с учетом сейсмических воздействий

1. Подпорные стены в районах с сейсмичностью 7 и более баллов должны проектироваться с учетом существующих требований [4; 5].

2. Интенсивность горизонтального давления грунта от собственного веса и от равномерно распределенной нагрузки q , расположенной на поверхности призмы обрушения, следует определять по формулам, приведенным выше, при этом коэффициент горизонтального давления грунта при сейсмическом воздействии λ^* следует определять по формулам

$$\lambda^* = \frac{\cos^2(\varphi - \varepsilon - \omega) \cdot \cos(\varepsilon + \delta)}{\cos \omega \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot \cos(\varepsilon + \delta + \omega) \cdot (1 + \sqrt{z})^2},$$
$$z = \frac{\sin(\varphi - \rho - \omega) \cdot \sin(\varphi + \delta)}{\cos(\varepsilon + \delta + \omega) \cdot \cos(\varepsilon - \rho)},$$

где ω – угол отклонения от вертикали равнодействующей веса грунта и временной нагрузки с учетом сейсмического воздействия определяется по формуле

$$\omega = \operatorname{arctg}(A \cdot K_1).$$

При расчете подпорных стен произведение $A \cdot K_1$ следует принимать равным 0,04; 0,08 и 0,16 при расчетной сейсмичности соответственно 7, 8 и 9 баллов см. [4].

3.1. Высота подпорных стен, выполненных из бетона, бутобетона или каменной кладки, при расчетной сейсмичности площадки 8 баллов не должна превышать 12 м, а при расчетной сейсмичности 9 баллов не должна превышать 10 м. Высота железобетонных подпорных стен не ограничивается.

3.2. При расположении оснований смежных секций подпорной стены в разных уровнях перепад от одной отметки основания до другой должен производиться уступами с отношением высоты к длине уступа не более, чем 1:2.

3.3. При сооружении подпорных стен из вертикальных сборных элементов по верху стены следует предусматривать монолитный железобетонный пояс на всю длину секции.

3.4. Подпорные стены следует разделять сквозными вертикальными швами на секции длиной не более 15 м с учетом размещения каждой секции на однородных грунтах [1; 2; 3].

Определение давлений под подошвой подпорной стены

1. Сумма проекций всех сил на вертикальную плоскость для угловых подпорных стен (при $\varepsilon \leq \theta_0$)

$$F_v = F_{sa} \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon + \varphi') + \gamma' \cdot \gamma_f \left(\frac{1}{2} h(b-t) + td \right) + \frac{1}{2} \cdot \gamma_f \cdot b^2 \cdot \operatorname{tg} \beta,$$

где γ_f – коэффициент надежности по нагрузке, принимается равным 1,2.

2. Краевые давления на грунт под подошвой подпорной стены p_{\min}^{\max} , при эксцентриситете e приложения равнодействующей всех вертикальных сил относительно центра тяжести подошвы определяются по формуле

$$p_{\min}^{\max} = \frac{F_v}{b} \left(1 \pm \frac{6e}{b} \right),$$

где F_v – сумма проекций всех сил на вертикальную плоскость; e – эксцентриситет приложения равнодействующей всех сил относительно оси, проходящей через центр тяжести подошвы подпорной стены определяемый по формуле

$$e = \frac{M_0}{F_v},$$

где M_0 – сумма моментов определяется для угловых подпорных стен (при $e \leq \theta_0$)

$$M_0 = F_{sa} \left[h^* - \operatorname{tg}(\varepsilon + \varphi') \cdot \left(\frac{b}{2} - h^* \cdot \operatorname{tg} \varepsilon \right) \right] + \frac{1}{12} \gamma' \gamma_f (b-t) [h(b-4t) + 6td].$$

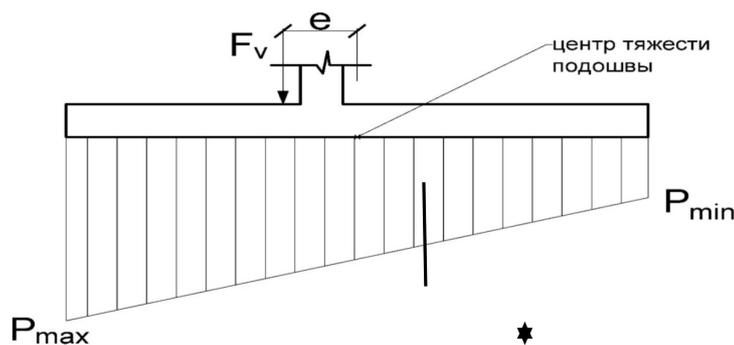


Рис. 3. Схема для определения напряжений под подошвой подпорной стенки

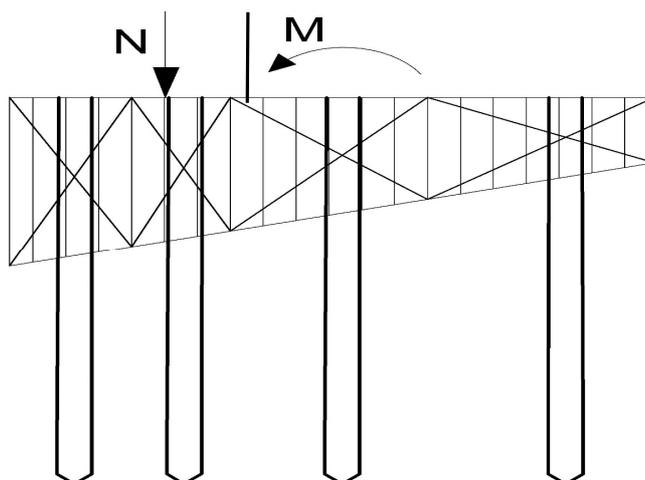


Рис. 4. Схема несимметричного расположения рядов свай при разбивке трапецевидной эпюры напряжений под фундаментной плитой

Порядок проектирования:

1. Задается число рядов свай, затем эпюру напряжений под фундаментной плитой делим на равновеликие по площади трапеции.

2. Центр тяжести каждой трапеции будет указывать положение рядов свай [6].

Обозначим число рядов свай через n . Введем систему координат следующим образом, ось Ox направим вдоль поверхности под подошвой подпорной стенки, ось Oy направим нормально к поверхности (рис. 5).

Вершины эпюры это вершины прямоугольной трапеции, обозначим их точками O, A, B, C , и положим $OA = c$, $OC = h$, $BC = d$,

где c, d, h - заданные размеры эпюры и для них имеют место следующие неравенства

$$d > c > 0, h > 0. \quad (1)$$

Тогда координаты вершин трапеции будут такими

$$O(0;0), A(0;c), B(h;d), C(h;0).$$

Разобьем отрезок OC точками x_1, x_2, \dots, x_{n-1} на n частей. Проведем через каждую полученную точку x_k ($k = 1, \dots, n-1$) отрезок $O_k A_k$ ($k = 1, \dots, n-1$) параллельный основаниям трапеции OA и BC . В результате разбиения, получим n трапеций подобных между собой $OA A_1 O_1; O_1 A_1 A_2 O_2; \dots; O_k A_k A_{k+1} O_{k+1}; \dots; O_{n-1} A_{n-1} BC$. Зададимся

целью найти такое разбиение отрезка OC точками x_1, x_2, \dots, x_{n-1} , чтобы полученные трапеции были равновеликими, т.е. имели равные площади

$$S_{OAA_1O_1} = S_{O_1A_1A_2O_2} = \dots = S_{O_kA_kA_{k+1}O_{k+1}} = \dots = S_{O_{n-1}A_{n-1}BC};$$

$$S_{OAA_1O_1} + S_{O_1A_1A_2O_2} + \dots + S_{O_{n-2}A_{n-2}A_{n-1}O_{n-1}} + S_{O_{n-1}A_{n-1}BC} = S_{OABC}.$$

Тогда площадь каждой из n полученных трапеций равна

$$S_{O_kA_kA_{k+1}O_{k+1}} = \frac{1}{n} S_{OABC}.$$

Рассмотрим теперь трапецию OAA_kO_k , где k произвольное от 1 до $n-1$. Площадь этой трапеции OAA_kO_k , обозначим S_k , а площадь трапеции $OABC$ через S . Заметим, что

$$S_k : S = k : n,$$

откуда

$$S_k = \frac{k}{n} \cdot S.$$

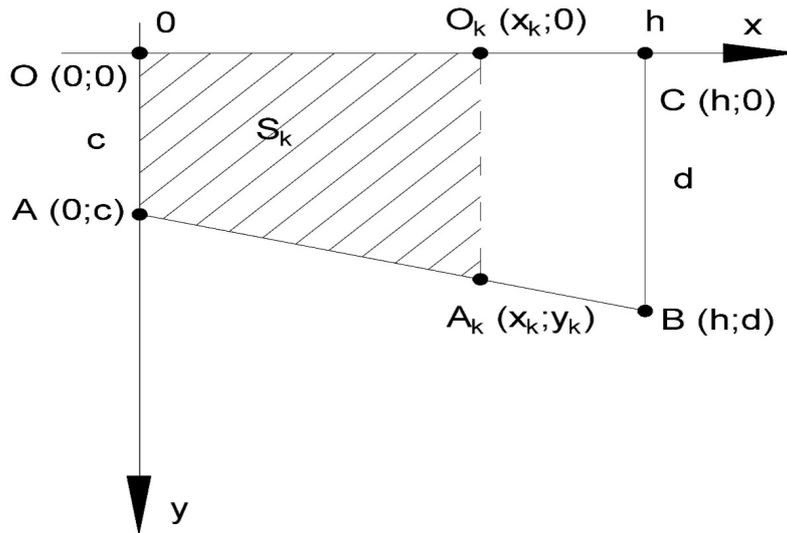


Рис. 5. Расчетная схема для определения площадей трапеций

В свою очередь $S = \frac{c+d}{2} \cdot h$ и $S_k = \frac{c+y_k}{2} \cdot x_k$, а потому имеем

$$\frac{c+y_k}{2} \cdot x_k = \frac{k}{n} \cdot \frac{c+d}{2} \cdot h.$$

Найдем уравнение стороны AB трапеции $OABC$. Воспользуемся уравнением прямой, проходящей через две заданные точки $A(0;c)$ и $B(h;d)$, получим

$$AB: y = \frac{d-c}{h} \cdot x + c.$$

Учитывая тот факт, что точка $A_k(x_k, y_k)$ лежит на прямой AB и, подставляя в последнее равенство $y_k = \frac{d-c}{h} \cdot x_k + c$, получим квадратное уравнение относительно x_k

$$(d-c) \cdot x_k^2 + 2ch \cdot x_k - \frac{k}{n}(c+d)h^2 = 0, \quad (2)$$

дискриминант которого

$$D = \frac{4}{n} \cdot h^2 \left[(n-k) \cdot c^2 + k \cdot d^2 \right] > 0$$

в силу (1) и для всех $k = 1, 2, \dots, n-1$. Следовательно, уравнение (2) имеет два корня

$$x_{k,1,2} = \frac{-c \pm \sqrt{\left(1 - \frac{k}{n}\right) \cdot c^2 + \frac{k}{n} \cdot d^2}}{d-c} \cdot h$$

один из которых, в силу выбора $d > c > 0, h > 0, k < n$, отрицательный. Получим

$$x_{k,1,2} = \frac{-c + \sqrt{\left(1 - \frac{k}{n}\right) \cdot c^2 + \frac{k}{n} \cdot d^2}}{d-c} \cdot h, \quad (3)$$
$$y_k = \frac{d-c}{h} \cdot x_k + c.$$

Таким образом найдено разбиение стороны трапеции точками вида (3) на n равновеликих трапеций.

Заключение. При расчетах подпорных стен по несущей способности, воспринимающих значительные нагрузки, в сложных геологических условиях, целесообразно применение свай. При этом располагать сваи в плане необходимо с учетом момента, действующего на подпорную стену с использованием метода равных по площади частей эпюры давления на основание.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Руководство по проектированию свайных фундаментов / НИИОСП им. Герсеванова. – М.: Стройиздат, 1985. – 479 с.*
2. *Основания, фундаменты и подземные сооружения: Справочник проектировщика. – М.: Стройиздат, 1980. – 151 с.*
3. *СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий. – М., 1986.*
4. *СНиП 2.06.07-87. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. – М., 1989.*
5. *Проектирование подпорных стен и стен подвалов: Справочное пособие к СНиП 2.09.03-85. – М.: Стройиздат, 1985. – 479 с.*
6. *ДБН В.1.2-2-2006. Нагрузки и воздействия: Нормы проектирования. – К.: Минстрой Украины, 2006. – 80 с.*
7. *ДБН В.1.1-12-2006. Строительство в сейсмических районах Украины. – К., 2006.*
8. *ДБН В.2.1-10-2009. Основы та фундаменти споруд. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.*
9. *ДБН В.2.1-10-2009. Зміна № 1. Основы та фундаменти споруд. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с.*
10. *Алексеев С.И. Механика грунтов, основания и фундаменты / С.И. Алексеев, П.С. Алексеев. – СПб., 2014. – 332 с.*

Стаття надійшла до редакції 17.08.2017

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Будівельна механіка» Одеського національного політехнічного університету
М.Г. Сурьянінов

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Енергетичне та водногосподарче будівництво» Одеської державної академії будівництва та архітектури **В.С. Осадчий**