

Определение размеров подпорной стенки.

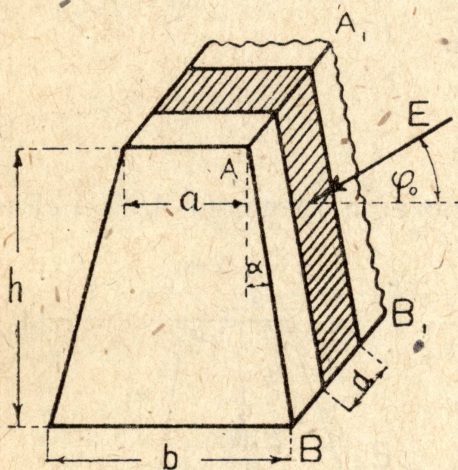
Введение.

Расчет подпорных стенок обычно ведется графоаналитическим методом, причем размеры сечения стенок наперед задаются и задача решается попытками.

Несомненно, что такое положение несколько затрудняет решение вопроса, т. к. трудно вперед задать необходимые и достаточные размеры стенки; особенно большое значение это имеет для студентов, которые впервые приступают к расчету сооружений.

Для облегчения решения задачи мы ниже приведем ряд формул, по которым можно сразу же правильно подобрать необходимые размеры подпорной стенки, в зависимости от величины давления на нее со стороны грунта.

Известно, что определение давления грунта на стенку E не зависит от ее размеров, кроме высоты h и очертания ограждающей поверхности $ABB_1 A_1$ (фиг. 1), а эти последние являются величинами наперед известными.



Фиг. 1.

Ширина верхнего основания a , как размер самого безопасного сечения стенки, также задается вперед и принимается от 75 см и выше, в зависимости от назначения и высоты стенки. Что касается размера d — длины стенки, то эта величина при расчете принимается равной 1 м.

Таким образом основным размером подпорной стенки, который необходимо определить, является b — ширина ее нижнего основания.

Давление земли на стенку E , как было указано выше, может быть определено до подбора ее сечений, имея известными только размеры ее ограждающей поверх-

ности a , h и d (фиг. 1). Поэтому величина этой силы, точка приложения и направление при подборе сечений будут известными.

Большей частью считают давление земли на стенку направленным под углом трения грунта о стенку φ_0 к нормали ее ограждающей поверхности, а практически при расчетах очень часто этим углом трения пренебрегают, тем более, что получающаяся при этом неточность идет в запас прочности. В последнем случае направление E будет нормальным к поверхности стенки.

В том случае, когда углом трения φ_0 грунта о стенку пренебрегают, при вертикальной ограждающей поверхности стенки направление E будет горизонтальным.

Можно также считать направление E горизонтальным у стенки, ограждающая поверхность которой наклонена в сторону грунта, т. к. трудно предположить это направление снизу вверх.

Когда задняя грань стенки наклонена от грунта (фиг. 1), то направле-

ние E при тех же условиях будет составлять с горизонталью угол α , равный углу наклона этой грани. В этом случае при небольших углах α для определения размеров стенки можно брать горизонтальную составляющую силы E . Получающаяся при этом небольшая неточность в определении размеров стенки здесь также пойдет в запас прочности, но такое допущение упрощает подбор сечения.

Из вышеизложенного вытекает, что при определении размеров стенки очень часто будут встречаться случаи, когда сила E будет направлена горизонтально, поэтому мы ниже разберем два условия при определении размеров:

- направление давления грунта на стенку E горизонтально;
- направление E под любым углом к горизонтали как общий случай.

Определение размеров стенки при горизонтальном направлении E .

Когда E направлена горизонтально, тогда на стенку будут действовать две взаимно-перпендикулярные силы: E — давление грунта на стенку и G — собственный ее вес.

А. Определение эксцентриситета приложения равнодействующей сил E и G .

Рассмотрим фиг. 2. Собственный вес стенки G равняется $\frac{a+b}{2} d h \gamma_k$, где γ_k — объемный вес кладки, и d — длина стенки.

При $d=1$ м будем иметь:

$$G = \frac{a+b}{2} h \gamma_k \quad (a)$$

Точка приложения G находится в центре тяжести трапеции ABB_1A_1 . Расстояние S_2 от нижнего основания до центра тяжести этой трапеции находится по общеизвестной формуле:

$$S_2 = \frac{2a+b}{a+b} \cdot \frac{h}{3} \quad (b)$$

Сила G в нижнем основании стенки составляет эксцентриситет η , который можно найти из подобия треугольников ONM и MM_1K , именно:

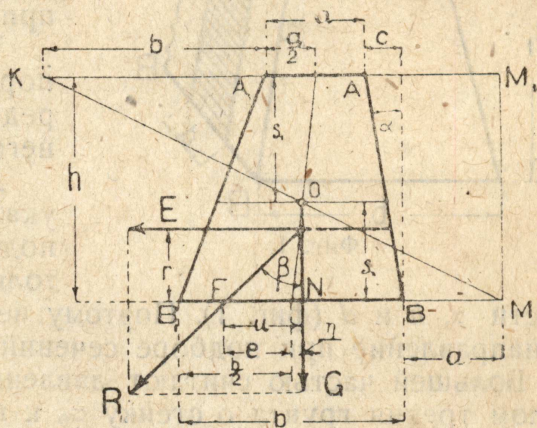
$$\frac{\frac{b}{2} - \eta + a}{S_2} = \frac{b + 2a + c}{h},$$

где $c = h \operatorname{tg} \alpha$.

Подставив сюда значение S_2 из формулы (b) и сделав преобразования, получим:

$$\eta = \frac{b^2 + ab - 2a^2 - 2bc - 4ac}{6(a+b)} = \frac{b(b+a-2c) - 2a(a+2c)}{6(a+b)} \quad (1)$$

Здесь, а также и в последующих формулах, значение c подставляется со своим знаком, т. е. при наклоне грани AB от грунта, как показано на фиг. 1 и 2, ставится плюс, при наклоне в сторону грунта — минус.



Фиг. 2

При вертикальной грани AB , $\alpha=0$, $c=0$ будем иметь:

$$\eta = \frac{b(a+b) - 2a^2}{6(a+b)} \quad (1a)$$

Равнодействующая сил E и $G-R$ пересекает нижнее основание стенки в точке F , и расстояние от этой точки до направления силы G выразится отрезком $FN=u$, величина которого определится:

$$u = r \operatorname{tg} \beta,$$

где r —расстояние от нижнего основания стенки до направления E ,

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{E}{G} = \frac{2E}{(a+b) h \gamma_k} \quad (c)$$

После подстановки $\operatorname{tg} \beta$ по форм. (c), получим:

$$u = \frac{2Er}{(a+b) h \gamma_k} \quad (d)$$

Величина эксцентриситета e , точки приложения равнодействующей сил E и $G-R$, в основании BB_1 , как видно из черт. 2, выразится:

$$e = u - \eta.$$

Сделав подстановку значений u из форм. (d) и η из форм. 1, найдем:

$$\begin{aligned} e &= \frac{2Er}{(a+b) h \gamma_k} - \frac{b^2 + ab - 2a^2 - 2bc - 4ac}{6(a+b)} = \\ &= \frac{12E \frac{r}{h} - \gamma_k [b(b+a-2c) - 2a(a+2c)]}{6\gamma_k(a+b)} \end{aligned} \quad (2)$$

При вертикальной грани AB , $c=0$

$$e = \frac{12E \frac{r}{h} - \gamma_k [b(b+a) - 2a^2]}{6\gamma_k(a+b)} \quad (2a)$$

Работа стенки должна отвечать как условиям прочности, так и условиям устойчивости ее от опрокидывания и сдвига, поэтому в зависимости от этих условий и перейдем к определению размеров.

В. Определение размеров стенки из условия прочности.

Напряжения в швах стенки определяются по формуле эксцентричного сжатия для прямоугольного сечения и они не должны превосходить допускаемого, поэтому нашим исходным уравнением будет:

$$\sigma = -\frac{N}{bd} \left[1 \pm \frac{6e}{b} \right] \leq R_{k_1} \quad (e)$$

а т. к. мы E считаем горизонтальной, то величине N будет соответствовать сила G —собственный вес стенки, $d=1$ м, и поэтому для нашего случая формула прочности примет следующий вид:

$$R \leq -\frac{G}{b} \left[1 \pm \frac{6e}{b} \right] \leq -\frac{(a+b) h \gamma_k}{2b^2} (b \pm 6e) \quad (f)$$

где R —допускаемое напряжение.

Эту задачу следует решить два раза, т. к. в приведенной формуле (f) имеются два знака—плюс и минус; первому будут соответствовать допускаемые напряжения на сжатие R_d , второму—на растяжение R_z .

Решим задачу сначала из условия допускаемых напряжений на сжатие. В этом случае получим:

$$R_d \geq -\frac{(a+b)h\gamma_k}{2b^2} (b+6e).$$

Подставим значение e из форм. 2 и получим:

$$\begin{aligned} R_d &\geq -\frac{(a+b)h\gamma_k}{2b^2} \left[b + \frac{12E\frac{r}{h} - \gamma_k(b^2 + ab - 2a^2 - 2bc - 4ac)}{\gamma_k(a+b)} \right] = \\ &= -\frac{h}{b^2} \left[6E\frac{r}{h} + \gamma_k a^2 + \gamma_k dc + 2\gamma_k ac \right]; \text{ откуда:} \\ b^2 + \frac{\gamma_k ch}{R_d} b + \left[\frac{6Er + ah\gamma_k(a+2c)}{R_d} \right] &\geq 0. \end{aligned}$$

Решив уравнение, найдем:

$$b \geq -\frac{ch\gamma_k}{2R_d} + \sqrt{\left[\frac{ch\gamma_k}{2R_d} \right]^2 - \frac{6Er + ah\gamma_k(a+2c)}{R_d}}$$

Здесь R_d нужно подставить со знаком минус; после перемены знака будем иметь:

$$b \geq \frac{ch\gamma_k}{2R_d} + \sqrt{\left[\frac{ch\gamma_k}{2R_d} \right]^2 + \frac{6Er + ah\gamma_k(a+2c)}{R_d}} \quad (3)$$

Первый член под корнем в полученной формуле представляет очень малую величину по сравнению со вторым и им можно пренебречь, особенно приняв во внимание, что размеры стенки округляются до одной сотой и даже до одной десятой метра. После этого получим:

$$b \geq \frac{ch\gamma_k}{2R_d} + \sqrt{\frac{6Er + ah\gamma_k(a+2c)}{R_d}} \quad (3a)$$

При вертикальной грани AB :

$$b \geq \sqrt{\frac{6Er + a^2 h \gamma_k}{R_d}} \quad (3b)$$

Решим далее задачу из условия допускаемых растягивающих напряжений R_z .

$$\begin{aligned} R_z &\geq -\frac{(a+b)h\gamma_k}{2b^2} (b-6e) = \\ &= -\frac{(a+b)h\gamma_k}{2b^2} \left[b - \frac{12E\frac{r}{h} - \gamma_k(b^2 + ab - 2a^2 - 2bc - 4ac)}{\gamma_k(a+b)} \right] = \\ &= -\frac{h}{b^2} \left[b^2 \gamma_k + ab \gamma_k - 6E\frac{r}{h} - a^2 \gamma_k - bc \gamma_k - 2ac \gamma_k \right], \end{aligned}$$

откуда:

$$b^2 + \frac{(a-c)h\gamma_k}{(R_z + h\gamma_k)} b - \frac{6Er + ah\gamma_k(a+2c)}{(R_z + h\gamma_k)} \geq 0.$$

Из полученного уравнения найдем:

$$b \geq -\frac{(a-c)h\gamma_k}{2(R_z + h\gamma_k)} + \sqrt{\left[\frac{(a-c)h\gamma_k}{2(R_z + h\gamma_k)}\right]^2 + \frac{6Er + ah\gamma_k(a+2c)}{R_z + h\gamma_k}} \quad (4)$$

Величиной первого члена под корнем, за малостью по сравнению со вторым можно пренебречь, и формула примет следующий вид:

$$b \geq -\frac{(a-c)h\gamma_k}{2(R_z + h\gamma_k)} + \sqrt{\frac{6Er + ah\gamma_k(a+2c)}{R_z + h\gamma_k}} \quad (5)$$

При вертикальной ограждающей плоскости $c=0$, и тогда:

$$b \geq -\frac{ah\gamma_k}{2(R_z + h\gamma_k)} + \sqrt{\frac{6Er + a^2h\gamma_k}{R_z + h\gamma_k}} \quad (5a)$$

Материал, употребляющийся для кладки подпорных стенок, как например, бетон и бутовый камень, очень слабо воспринимает растягивающие усилия и потому при расчетах для таких материалов напряжений на растяжение не допускается и, в особенности, нельзя допускать напряжений растяжения в подошве основания фундамента. При этих условиях ($R_z=0$) форм. 4 преобразуется:

$$b \geq -\frac{a-c}{2} \sqrt{\left[\frac{a-c}{2}\right]^2 + \frac{6Er + ah\gamma_k(a+2c)}{h\gamma_k}},$$

откуда:

$$b \geq -\frac{a-c}{2} + \sqrt{\frac{6Er}{h\gamma_k} + \frac{a(5a+2c)+c^2}{4}}; \quad (6)$$

при $c=0$

$$b \geq -\frac{a}{2} + \sqrt{\frac{6Er}{h\gamma_k} + \frac{5}{4}a_0} \quad (6a)$$

В приведенных формулах должны подставляться размеры в метрах, силы в тоннах, напряжения—в $т/м^2$ и ширина основания стенки b будет получаться в метрах.

С. Определение размеров стенки из условия устойчивости.

а) На опрокидывание. Коэффициент устойчивости на опрокидывание выражается:

$$\mu = \frac{M_{удерж.}}{M_{опрок.}}$$

Величина этого коэффициента μ принимается от 1,25 и выше. Некоторые авторы ¹⁾ рекомендуют брать $\mu \geq 1,5$.

$$M_{уд.} \geq \mu M_{опр.} \quad (k)$$

$$M_{уд.} = G \cdot \left[\frac{b}{2} + \eta \right] \quad (\text{см. фиг. 2}),$$

¹⁾ В. П. Фармаковский, Расчет подпорных стен. Изд. 1934 г.

поэтому:

$$M_{уд.} = \frac{a+b}{2} h \gamma_k \left[\frac{b}{2} + \eta \right] =$$

$$= \frac{a+b}{2} h \gamma_k \left[\frac{b}{2} + \frac{b^2 + ab - 2a^2 - 2bc - 4ac}{6(a+b)} \right] =$$

$$= \frac{h \gamma_k}{12} (4b^2 + 4ab - 2a^2 - 2bc - 4ac) \quad (l)$$

$$M_{отп.} = E \cdot r \quad (m)$$

Уравнения (l) и (m) подставим в уравнение (k):

$$\frac{h \gamma_k}{12} (4b^2 + 4ab - 2a^2 - 2bc - 4ac) \geq \mu E \cdot r;$$

после преобразования придем к квадратному уравнению:

$$b^2 + \frac{2a-c}{2} \cdot b - \frac{a(a+2c)}{2} - \frac{12 \mu E r}{4 h \gamma_k} \geq 0$$

Из полученного уравнения найдем:

$$b \geq -\frac{2a-c}{4} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{12 \mu E r}{h \gamma_k} + 3a(a+c) + \frac{c^2}{4}} \quad (7)$$

При вертикальной задней грани ($c=0$):

$$b \geq -\frac{a}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{12 \mu E r}{h \gamma_k} + 3a^2} \quad (7a)$$

б) На сдвиг или скольжение. Коэффициент устойчивости на сдвиг

$$m \geq \frac{G \cdot f}{E}$$

(здесь отпор грунта от фундамента не учитывается), где f — коэффициент трения.

Коэффициент m принимается от 1,2 и выше. (В. П. Фармаковский рекомендует брать не ниже 1,5).

$$G \cdot f \geq m E \quad (n),$$

или

$$\frac{a+b}{2} \gamma_k h f \geq m E,$$

откуда:

$$b \geq \frac{2m E}{\gamma_k h f} - a \quad (8)$$

Если учесть отпор грунта на высоте фундамента, то формула (n) примет следующий вид:

$$G f \geq m [E - Q_0],$$

$$b \geq \frac{2m (E - Q_0)}{\gamma_k h f} - a, \quad (8a)$$

где Q_0 есть отпор грунта.

Для вертикальной грани фундамента Q_0 выражается общеизвестной формулой:

$$Q_0 = \frac{1}{2} \gamma h_0^2 \operatorname{tg}^2 \left[45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right], \quad (p)$$

где: γ —объемный вес грунта, h_0 —глубина заложения фундамента; φ —угол естественного откоса.

Определив размеры из условий прочности и устойчивости стенки и выбрав из них наибольшую величину b , можно считать задачу решенной.

Проверку подпорной стенки как на ее прочность, так и на устойчивость, можно производить, пользуясь обычными формулами прочности и устойчивости.

Определение размеров стенки при любом направлении E .

На фиг. 3 видно, что сила E направлена к горизонту под углом θ , который является известным:

$$\theta = \alpha + \varphi_0,$$

где α —угол наклона задней грани стенки; φ_0 —угол трения грунта о стенку

Сила

$$G = \frac{a+b}{2} h \gamma_k,$$

как и в ранее рассмотренном случае, составляет в нижнем основании стенки тот же эксцентриситет η .

Сила E пересекается с G в точке O , расстояние до которой $z = r = y$; здесь r есть расстояние от нижнего основания до точки приложения E .

Рассматривая фиг. 3, найдем:

$$n = r \operatorname{tg} \alpha$$

$$m = \frac{b}{2} - n - \eta = \frac{b}{2} - r \operatorname{tg} \alpha - \eta$$

$$y = m \operatorname{tg} \theta = \left[\frac{b}{2} - r \operatorname{tg} \alpha - \eta \right] \operatorname{tg} \theta$$

$$z = r - y = r - \left[\frac{b}{2} - r \operatorname{tg} \alpha - \eta \right] \operatorname{tg} \theta \quad (a)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{E \cos \theta}{G + E \sin \theta} = \frac{2E \cos \theta}{(a+b) h \gamma_k + 2E \sin \theta} \quad (b)$$

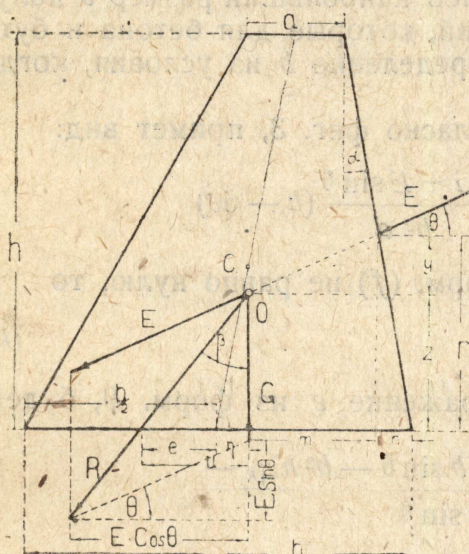
А. Определение эксцентриситета R .

Равнодействующая сил E и G — R составляет в основании стенки эксцентриситет e , который может быть выражен:

$$e = u - \eta, \quad (c)$$

где

$$u = z \operatorname{tg} \beta = \frac{2Er \cos \theta - 2E \left[\frac{b}{2} - r \operatorname{tg} \alpha - \eta \right] \sin \theta}{(a+b) h \gamma_k + 2E \sin \theta} \quad (d)$$



Фиг. 3.

Подставив в выражение (с) значение u по форм. (d) и η по форм. 1, получим:

$$e = \frac{2Er \cos \theta - Eb \sin \theta + 2Er \operatorname{tg} \alpha \sin \theta + 2E \sin \theta \left[\frac{b^2 + ab - 2a^2 - 2bc - 4ac}{6(a+b)} \right]}{(a+b)h\gamma_k + 2E \sin \theta} - \frac{b^2 + ab - 2a^2 - 2bc - 4ac}{6(a+b)}; \quad (e)$$

после преобразования найдем

$$e = \frac{12Er \cos \theta (1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta) - 6Eb \sin \theta - b^2 h \gamma_k - h \gamma_k (a - 2c) b + 2ah \gamma_k (a + 2c)}{6[h \gamma_k (a + b) + 2E \sin \theta]} \quad (9)$$

При $\theta = 0$, т. е. при горизонтальной E , форм. 9 примет вид форм. 2.

В. Определение размера стенки из условия прочности.

Вследствие того, что в большинстве случаев наибольший размер b получается из условия растягивающих напряжений, которые для бетона и бута не допускаются, ниже будет приведено определение b из условия, когда $R_z = 0$.

Основная формула для этого случая, согласно фиг. 3, примет вид:

$$R_z = 0 = -\frac{N}{bd} \left[1 - \frac{6e}{b} \right] = -\frac{G + E \sin \theta}{b^2 d} (b - 6e)$$

Так как выражение перед скобками в форм. (f) не равно нулю, то

$$b - 6e = 0 \quad (k)$$

Подставив в полученную формулу (k) выражение e из форм. 9, будем иметь:

$$b - \frac{12Er \cos \theta (1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta) - 6Eb \sin \theta - b^2 h \gamma_k - h \gamma_k (a - 2c) b + 2ah \gamma_k (a + 2c)}{h \gamma_k (a + b) + 2E \sin \theta} = 0.$$

Сделав преобразования, придем к квадратному уравнению:

$$b^2 + b \left[\frac{4E \sin \theta}{h \gamma_k} + a - c \right] - \frac{6Er \cos \theta (1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta)}{h \gamma_k} a - (a + 2c) = 0 \quad (l)$$

Сделаем обозначения:

$$\frac{4E \sin \theta}{h \gamma_k} = k$$

и

$$\cos \theta (1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta) = \psi.$$

Тогда уравнение (b) напишется:

$$b^2 + (k + a - c)b - \frac{6Er\psi}{h \gamma_k} - a(a + 2c) = 0 \quad (m)$$

Откуда:

$$b = -\frac{k+a-c}{2} + \sqrt{\left(\frac{k+a-c}{1}\right)^2 + \frac{6Er\psi}{h\gamma_k} + a(a+2c)} \quad (10)$$

При горизонтальном направлении силы E будем иметь: $\theta = 0$; $k = 0$ $\psi = 1$ и мы приходим уже к известной формуле. (6).

С. Определение b из условий устойчивости.

а) На опрокидывание.

$$M_{уд.} \geq \mu M_{опр.} \quad (k)$$

На фиг. 3 видно, что

$$\begin{aligned} M_{опр.} &= E \cdot r \cos \theta - E(b-n) \sin \theta = \\ &= Er \cos \theta (1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta) - Eb \sin \theta \end{aligned} \quad (n)$$

$$M_{уд.} = G \left[\frac{b}{2} + \eta \right] = \frac{h\gamma_k}{12} (4b\theta + 4ab - 2a^2 - 2bc - 4ac) \quad (o)$$

После подстановки уравнений (n) и (o) в уравнение (k) и после преобразований получим:

$$\begin{aligned} b^2 + \frac{1}{2} \left[2a - c + \frac{6\mu E \sin \theta}{h\gamma_k} \right] b - \frac{12\mu Er \cos \theta (1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta)}{4h\gamma_k} - \\ - \frac{2a(a+2c)}{4} = 0. \end{aligned}$$

Обозначив через $p = \frac{6\mu E \sin \theta}{h\gamma_k}$ и через $\psi = \cos \theta (1 + \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta)$, это уравнение получится в более простом виде:

$$b^2 + \frac{1}{2} (2a + p - c) b - \frac{12\mu Er \psi}{4h\gamma_k} - \frac{2a(a+2c)}{4} = 0,$$

откуда

$$b = -\frac{2a+p-c}{4} + \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{2a+p-c}{2}\right]^2 + \frac{12\mu Er\psi}{h\gamma_k} + 2a(a+2c)} \quad (11)$$

E горизонтальна; $\theta = 0$; $p = 0$; $\psi = 1$.

Формула 11 преобразуется в форм. 7.

б. На сдвиг или скольжение.

При наклонной силе E будем иметь, без учета отпора грунта на высоте фундамента:

$$(G + E \sin \theta) f \geq m E \cos \theta,$$

Подставив сюда значение G , найдем:

$$\frac{a+b}{2} h\gamma_k f \geq m E \cos \theta - E f \sin \theta,$$

или

$$a h\gamma_k f + b h\gamma_k f \geq 2E \cos \theta (m - f \operatorname{tg} \theta),$$

откуда

$$b \geq \frac{2E \cos \theta (m - f \operatorname{tg} \theta)}{h\gamma_k f} - a \quad (12)$$

При учете отпора грунта на высоте фундамента, размер b можно определить по формуле:

$$b = \frac{2E \cos \theta (m - f \sin \theta) - Q_0 \cdot m}{h \gamma_k f} - a \quad (12a).$$

В этих формулах обозначения приняты те же, что и в предыдущих.

Пользуясь приведенными выше формулами, можно при расчете подпорных стенок получить сразу же правильное определение ширины нижнего основания стены.

ПРИМЕР.

Сделать расчет подпорной стенки, если известно, что высота стенки $h = 6$ м, наклон ее задней грани — 1 : 10, грунт — песок естественной влажности; допускаемое напряжение на грунт в основании фундамента $\delta_0 = 2,5$ кг/см². На поверхности грунта имеется равномерно-распределенная нагрузка $q = 2$ т/м².

Решение.

Принимаем бутовую кладку из камня средней твердости, на цементном растворе при допускаемом напряжении на сжатие $R_d = 15$ кг/см², на растяжение $R_z = 0$.

Объемный вес кладки $\gamma_k = 2,3$ т/м³.

Глубину заложения фундамента примем из условия промерзания грунта $h_0 = 2$ м.

Согласно таблиц объемный вес грунта возьмем $\gamma = 1,8$ т/м³, угол естественного откоса $\varphi = 40^\circ$.

Направление силы E — давление грунта на стенку берем горизонтально (при этом условии угол трения грунта о стенку φ_0 будет равен углу наклона задней грани, если считать, что E направлена к ее нормали под углом φ_0).

Определение размеров стенки.

Принимаем ширину по верху $a = 1$ м. Для определения ширины основания стенки b , при обресе фундамента (фиг. 4), произведем вычисление E на высоту h и воспользуемся при этом формулами аналитического решения ¹⁾.

Сила E будет состояться из E_1 — давления самого грунта на стенку и E_2 — давления равномерно-распределенной нагрузки.

$$E_1 = \frac{1}{2} h^2 \gamma \left[\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi - \alpha}{2} \right) - \operatorname{tg} \alpha \right]^2 \cos \alpha$$

$$\text{В нашем случае } \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{10}$$

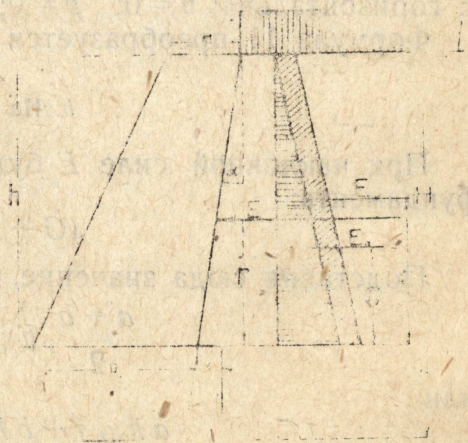
$$\alpha \approx 5^\circ 40'; \quad \cos \alpha = 0,995$$

$$\operatorname{tg} \left[45^\circ - \frac{40^\circ - 5^\circ 40'}{2} \right] = \operatorname{tg} 27^\circ 50' = 0,528$$

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot 6^2 \cdot 1,8 (0,528 - 0,1)^2 \cdot 0,995 = 5,9 \text{ т.}$$

$$E_2 = \frac{2 q E_1}{\gamma h} = \frac{2 \cdot 2}{1,8 \cdot 6} \cdot 5,9 \approx 2,2 \text{ т}$$

$$E = 5,9 + 2,2 = 8,1 \text{ т.}$$



Фиг. 4.

¹⁾ Проф. Иловайский. Два вопроса о давлении земли на стену. Изд. 1933 г.

Распределение давления земли по стенке показано на фиг. 4.
Найдем r —расстояние от основания стенки при обресе фундамента до точки приложения силы E .

Из чертежа видно, что $r_1 = \frac{h}{3} = 2 \text{ м}$ и $r_2 = \frac{h}{2} = 3 \text{ м}$

$$E \cdot r = E_1 \cdot r_1 + E_2 \cdot r_2,$$

$$r = \frac{E_1 r_1 + E_2 r_2}{E} = \frac{5,9 \cdot 2 + 2,2 \cdot 3}{8,1} = 2,27 \text{ м.}$$

Определение b_1 —ширины стенки по низу при обресе фундамента произведем на прочность из условия растягивающих напряжений и из условия устойчивости на опрокидывание при коэффициенте устойчивости $\mu = 1,4$.

При расчете из условия растяжения, когда $R_z = 0$, будем пользоваться форм. 6:

$$b = -\frac{a-c}{2} + \sqrt{\frac{6Er}{\gamma_k h} + \frac{a(5a+2c)+c^2}{4}}$$

Для нашего случая $b = b_1$; $c = -h \operatorname{tg} \alpha = -6 \cdot 0,1 = -0,6 \text{ м}$

$$b_1 = -\frac{1+0,6}{2} + \sqrt{\frac{6 \cdot 8,1 \cdot 2,27}{2,3 \cdot 6} + \frac{1 \cdot (5 - 2 \cdot 0,6) + 0,6^2}{4}} \cong 2,2 \text{ м.}$$

Из условия устойчивости на опрокидывание воспользуемся форм. 7:

$$b = -\frac{2a-c}{4} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{12\mu Er}{\gamma_k h} + 3a(a+c) + \frac{c^2}{4}} =$$

$$= -\frac{2 \cdot 1 + 0,6}{4} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{12 \cdot 1,4 \cdot 8,1 \cdot 2,27}{2,3 \cdot 6} + 3 \cdot 1(1 - 0,6) + \frac{0,6^2}{4}} = 1,8 \text{ м.}$$

Следует принять наибольшее из полученных выражений, т. е. $b_1 = 2,2 \text{ м}$.

При определении ширины основания фундамента b_2 , определим давление земли на фундамент, как на вертикальную стенку, а величиной k_1 обреса фундамента со стороны грунта при этом пренебрежем.

Полная высота стенки с фундаментом:

$$H = h + h_0 = 6 + 2 = 8 \text{ м.}$$

Давление на всю высоту H от грунта:

$$E' = \frac{1}{2} \gamma H^2 \operatorname{tg}^2 \left[45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right] = \frac{1}{2} \cdot 1,8 \cdot 8^2 \cdot \operatorname{tg}^2 (45^\circ - 20^\circ) =$$

$$= 1,8 \cdot 32 \cdot 0,466^2 = 12,5 \text{ т.}$$

Интенсивность давления грунта (по низу фундамента) (фиг. 5):

$$e_2 = \frac{2E'}{H} = \frac{2 \cdot 12,5}{8} = 3,125 \text{ т/м.}$$

Интенсивность давления грунта по верху фундамента:

$$e_1 = e_2 \frac{h}{H} = 3,125 \cdot \frac{6}{8} = 2,344 \text{ т/м.}$$

Давление земли на фундамент от грунта выразится:

$$E'_0 = \frac{3,125 + 2,344}{2} \cdot 2 = 5,47 \text{ м.}$$

От равномерно-распределенной нагрузки:
полное на всю высоту —

$$E'' = \frac{2qE'}{\gamma H} = \frac{2 \cdot 2}{1,8 \cdot 8} \cdot 12,5 = 3,47 \text{ м.}$$

на высоту фундамента h_0 —

$$E''_0 = 3,47 \cdot \frac{6}{8} = 2,6 \text{ м.}$$

Интенсивность от равномерно-распределенной нагрузки

$$e = \frac{3,47}{8} = 0,434 \text{ м/м.}$$

Полное давление на фундамент:

$$E_0 = E'_0 + E''_0 = 5,47 + 2,6 = 8,07 \text{ м} \cong 8,1 \text{ м.}$$

Полная интенсивность давления:

по низу фундамента: $e_{\max} = 3,125 + 0,434 = 3,56 \text{ м/м};$

по верху: $e_{\min} = 2,344 + 0,434 = 2,88 \text{ м/м.}$

Расстояние от подошвы основания фундамента до точки приложения E_0 — r_0 найдется:

$$r_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{3,56 + 2 \cdot 2,88}{3,56 + 2,88} = 0,965 \text{ м.}$$

Полное давление (на стену с фундаментом):

$$E_{\max} = 8,1 + 8,1 = 16,2 \text{ м.}$$

Расстояние от основания фундамента до точки приложения $E_{\max}$:

$$r_m = \frac{E(r + h_0) + E_0 r_0}{E_{\max}} = \frac{8,1 \cdot 4,27 + 8,1 \cdot 0,965}{16,2} = 2,62 \text{ м.}$$

Определение b_2 — ширины основания фундамента.

Определим величину b_2 из условия сжатия, при допускаемом напряжении на грунт $\sigma_0 = 2,5 \text{ кг/см}^2 = 25 \text{ т/м}^2$. Для этого применим формулу 3а:

$$b = \frac{ch\gamma_k}{2\sigma_0} + \sqrt{\frac{6Er + ah\gamma_k(a + 2c)}{\sigma_0}}.$$

Для вычисления ширины фундамента следует брать не полное b_2 , а от точки пересечения продолжения задней грани стенки с подошвой фундамента, т. е. из b_2 следует вычесть $k_1 + h_0 \operatorname{tg} \alpha$.

Принимая $k_1 = 0,3 \text{ м}$, найдем:

$$b = b_2 - (0,3 + 2 \cdot 0,1) = b_2 - 0,5; \quad c = -H \operatorname{tg} \alpha = -8 \cdot \frac{1}{10} = -0,8 \text{ м.}$$

$$b_2 - 0,5 = -\frac{2,3 \cdot 0,8 \cdot 8}{2,2 \cdot 5,10} + \sqrt{\frac{6 \cdot 16,2 \cdot 2,62 + 1,2 \cdot 3,8 (1 - 2,0,8)}{2,5 \cdot 10}} =$$

$$= -0,29 + 3,12 = 2,83 \text{ м};$$

$$b_2 = 2,83 + 0,5 = 3,33 \text{ м.}$$

Определение из условия растяжения $R_z = 0$ (по формуле 6):

$$b_2 - 0,5 = -\frac{1 + 0,8}{2} + \sqrt{\frac{6 \cdot 16,2 \cdot 2,62}{2,3 \cdot 8} + \frac{1 \cdot (5 - 2,0,8) + 0,8}{4}} =$$

$$= -0,9 + 3,85 = 2,95 \text{ м};$$

$$b_2 = 2,95 + 0,5 = 3,45 \text{ м} \cong 3,5 \text{ м.}$$

Определение b_2 из условия опрокидывания (формула 7):

$$b_2 - 0,5 = -\frac{2,1 + 0,8}{4} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{12 \cdot 1,4 \cdot 16,2 \cdot 2,62}{2,3 \cdot 8} + 3,1 (1 - 0,8) + \frac{0,64}{4}} =$$

$$= -0,70 + 3,15 = 2,45 \text{ м}$$

$$b_2 = 2,45 + 0,50 = 2,95 \text{ м} \cong 3 \text{ м.}$$

Определение b_2 из условия сдвига при $m = 1,25$ и коэффициенте трения $f = 0,55$ (формула 8):

$$b_2 - 0,5 = -\frac{2,1 \cdot 25 \cdot 16,2}{2,3 \cdot 8 \cdot 0,55} - 1 = 4,0 - 1 = 3,0 \text{ м (без учета отпора);}$$

$$b_2 = 3,0 + 0,5 = 3,5 \text{ м.}$$

Из всех найденных значений b_2 выбираем наибольшее и принимаем $b_2 = 3,5 \text{ м.}$

Проверка стенки на прочность и устойчивость.

В сечении 1—2 (фиг. 5)

$$M = Er = 8,1 \cdot 2,27 = 18,4 \text{ т/м}$$

По формуле 1:

$$\eta = \frac{2,2 (2,2 + 1,0 + 2,0,6) - 2,1 (1 - 2,0,6)}{6 (1 + 2)} = 0,525 \text{ м.}$$

$$\sigma = \pm \frac{M}{W_1} - \frac{G_1}{b_1} \left[1 \pm \frac{6\eta}{b_1} \right],$$

где

$$G_1 = \frac{a + b_1}{2} h \gamma_k + \frac{1 + 2,2}{2} \cdot 6 \cdot 2,3 = 22,1 \text{ т,}$$

$$W_1 = \frac{db_1^2}{6} = \frac{1 \cdot 2,2^2}{6} = 0,807 \text{ м}^3.$$

В точке 1:

$$\sigma_1 = -\frac{18,4}{0,807} - \frac{23,1}{2,2} \left[1 - \frac{6 \cdot 0,525}{2,2} \right] =$$

$$= -22,8 - 10 (1 - 1,43) = -18,5 \text{ т/м}^2 = -1,85 \text{ кг/см}^2.$$

В точке 2:

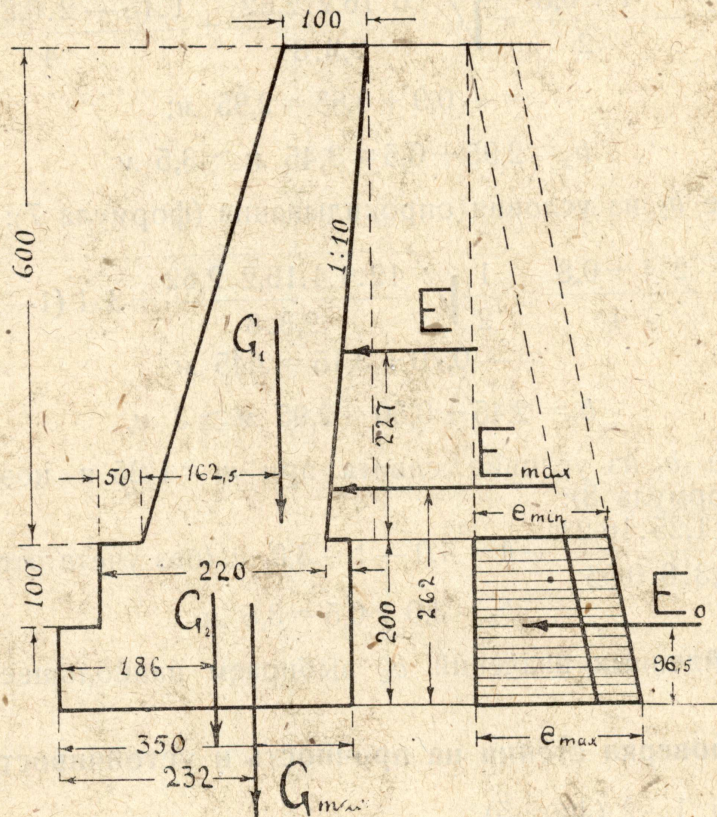
$$\sigma_2 = +22,8 - 10 (1 + 1,43) = -1,5 \text{ т/м}^2 = -0,15 \text{ кг/см}^2 < 0.$$

На опрокидывание:

$$p_1 = \frac{G_1 \left[\frac{b_1}{2} + \eta \right]}{Er} = \frac{22,1 (1,1 + 0,525)}{18,4} = 1,95 > 1,4$$

В сечении (шве) 3—4

Для экономии материала с левой стороны фундамент сделаем ступенчатым, с шириной ступени равной 0,5 м (фиг. 5)



Фиг. 5.

Определим вес фундамента:

$$G_2 = G'_2 + G''_2 = 3,5 \cdot 1,2,3 + 3 \cdot 1,2,3 = 8,1 + 6,6 = 14,7 \text{ т}$$

Полный вес стены:

$$G_{\max} = G_1 + G_2 = 22,1 + 14,7 = 36,8 \text{ т.}$$

Расстояние от точки 3 до G_2 :

$$S_2 = \frac{8,1 \cdot 1,75 + 6,6 \cdot 2}{14,7} = 1,86 \text{ м.}$$

Расстояние от той же точки до $G_{\max}$:

$$S_m = \frac{22,1 \cdot 2,625 + 14,7 \cdot 1,86}{36,8} = 2,32 \text{ м.}$$

Эксцентриситет точки приложения $G_{\max}$ в основании фундамента:

$$\eta_0 = 2,32 - 1,75 = 0,57 \text{ м}$$

$$M_{\max} = E_{\max} \cdot r_m = 16,2 \cdot 2,62 = 42,5 \text{ тм}$$

$$W_2 = \frac{db_2^2}{6} = \frac{1 \cdot 3,5^2}{6} = 2,04 \text{ м}^3.$$

Найдем напряжения:
в точке 3 —

$$\sigma_3 = - \frac{42,5}{2,04} - \frac{36,8}{3,5} \left[1 - \frac{6 \cdot 0,57}{3,5} \right] = -20,8 -$$

$$-10,5 (1 - 0,98) = -21,0 \text{ т/м}^2 = -2,1 \text{ кг/см}^2 < 2,5;$$

в точке 4 — $\sigma_4 = 20,8 - 10,5 \cdot 1,98 = -20,8 - 20,8 = 0.$

Проверка на устойчивость всей стенки (вместе с фундаментом)

На опрокидывание:

$$M_{\text{опр.}} = E_{\text{max}} \cdot r_m = 42,5 \text{ т/м},$$

$$M_{\text{уд.}} = G_{\text{max}} \cdot S_m = 36,8 \cdot 2,32 = 85,3 \text{ т/м},$$

$$\nu = \frac{85,3}{42,5} \cong 2 > 1,4.$$

На сдвиг:

$$m = \frac{36,8 \cdot 0,55}{16,2} = 1,25.$$

Проверка показала, что данная подпорная стенка отвечает заданным условиям:

Определение напряжений можно произвести, на основании сделанных ранее выводов, более просто, чем приведено выше. Для примера определим напряжения в подошве основания фундамента.

Было найдено:

$$E_{\text{max}} = 16,2 \text{ т}; \quad r_m = 2,62 \text{ м}$$

$$G_{\text{max}} = 36,8 \text{ т}; \quad \eta_0 = 0,57 \text{ м}.$$

Расстояние от G_{max} до точки приложения R_{max} :

$$u = r_m \operatorname{tg} \beta = r_m \frac{E_{\text{max}}}{G_{\text{max}}} = 2,62 \cdot \frac{16,2}{36,8} \cong 1,154 \text{ м}.$$

Эксцентриситет точки приложения R_{max} :

$$e = u - \eta_0 = 1,154 - 0,57 = 0,584 \text{ м}.$$

$$\sigma = - \frac{G_{\text{max}}}{b_2} \left[1 \pm \frac{6e}{b_2} \right].$$

В точке 3:

$$\sigma_3 = - \frac{36,8}{3,5} \left[1 - \frac{6 \cdot 0,584}{3,5} \right] = -10,5 (1 - 1) = 0.$$

В точке 4:

$$\sigma_4 = -10,5 \cdot 2 = -21 \text{ т/м}^2 = 2,1 \text{ кг/см}^2,$$

что подтверждает уже ранее вычисленное.

При графическом определении давления земли на стенку, когда сила E и расстояние до ее приложения берутся из чертежа, вычисление толщины стенки по вышеприведенным формулам получается простое и быстрое, т. к. в этом случае все величины, входящие в формулу, будут известными.