В. И. Лопанов.

Определение размеров подпорной стенки.

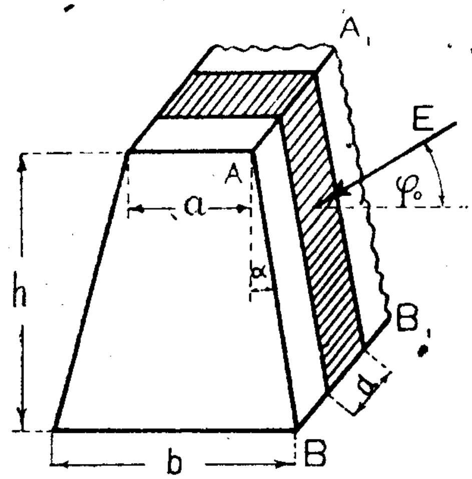
Введение.

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_1A_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 поверхности α, 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 направление 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:

а) направление давления грунта на стенку E горизонтально;

б) 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:

$$G=\frac{a+b}{2}\,h\,\gamma_k \qquad \text{(a)}$$

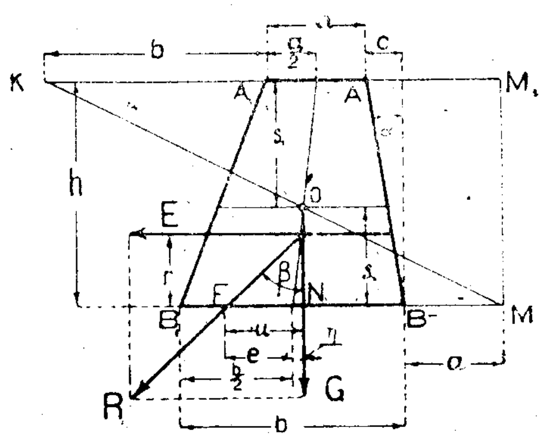
Точка приложения G находится в центре тяжести трапеции ABB_1A_1. Расстояние S_2 от нижнего основания до центра тяжести этой трапеции находится по общеизвестной формуле:

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

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 $c=h\operatorname{tg}\alpha$.



Фиг. 2

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

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

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.

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

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

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:

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

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

$$\mathrm{tg}\,\beta = \frac{E}{G} = \frac{2E}{(a+b)\,h\gamma_k} \tag{c}$$

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

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

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:

$$e = \frac{2Er}{(a+b)\,h\,\gamma_k} - \frac{b^2 + ab - 2a^2 - 2bc - 4ac}{6\,(a+b)} =$$

$$= \frac{12\,E\,\frac{r}{h} - \gamma_k[b(b+a-2c) - 2a\,(a+2c)]}{6\,\gamma_k\,(a+b)} \tag{2}$$

При вертикальной грани AB, $c = 0$

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

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:

$$\sigma = -\frac{N}{bd}\left[1 \pm \frac{6\,e}{b}\right] < R_{k_1} \tag{e}$$

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:

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

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:

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

Подставим значение e из форм. 2 и получим:

$$R_d \geqslant -\frac{(a+b)\,h\,\gamma_k}{2b^2}\left[b+\frac{12\,E\dfrac{r}{h}-\gamma_k\,(b^2+ab-2a^2-2bc-4ac)}{\gamma_k\,(a+b)}\right]=$$

$$=-\frac{h}{b^2}\left[6E\frac{r}{h}+\gamma_k\,a^2+\gamma_k\,dc+2\gamma_k\,ac\right]; \text{ откуда:}$$

$$b^2+\frac{\gamma_k\,ch}{R_d}\,b+\left[\frac{6\,Er+ah\,\gamma_k\,(a+2c)}{R_d}\right]\geqslant 0.$$

Решив уравнение, найдем:

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

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

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

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:

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

При вертикальной грани AB:

$$b \geqslant \sqrt{\frac{6\,Er+a^2\,h\,\gamma_k}{R_d}} \qquad (3b)$$

Решим далее задачу из условия допускаемых растягивающих напряжений R_z.

$$R_z \gtrless -\frac{(a+b)\,h\,\gamma_k}{2b^2}\,(b-6e)=$$

$$=-\frac{(a+b)\,h\,\gamma_k}{2b^2}\left[b-\frac{12E\dfrac{r}{h}-\gamma_k\,(b^2+ab-2a^2-2bc-4ac)}{\gamma_k\,(a+b)}\right]=$$

$$=-\frac{h}{b^2}\left[b^2\,\gamma_k+ab\,\gamma_k-6E\frac{r}{h}-a^2\,\gamma_k-bc\,\gamma_k-2ac\,\gamma_k\right],$$

откуда:

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

Из полученного уравнения найдем:

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

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

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

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

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

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:

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

откуда:

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

при $c=0$

$$b\geqslant-\frac{a}{2}+\sqrt{\frac{6\,Er}{h\gamma_k}+\frac{5}{4}a_0} \tag{6a}$$

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. Коэфициент устойчивости на опрокидывание выражается:

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

Величина этого коэфициента μ принимается от 1,25 и выше. Некоторые авторы [1]) рекомендуют брать $\mu\geqslant 1{,}5$.

$$M_{\text{уд.}}\geqslant\mu\,M_{\text{опр.}} \tag{k}$$

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

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

поэтому:

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

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

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

$$M_{\text{опр.}} = E \cdot r \qquad (m)$$

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

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

после преобразования придем к квадратному уравнению:

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

Из полученного уравнения найдем:

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

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

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

b) Н а с д в и г и л и с к о л ь ж е н и е. Коэфициент устойчивости на сдвиг

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

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

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

$$G \cdot f \geqslant m E \qquad (n),$$

или

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

откуда:

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

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

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

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

где Q_0 есть отпор грунта.

Для вертикальной грани фундамента Q_0 выражается общеизвестной формулой:

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

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.

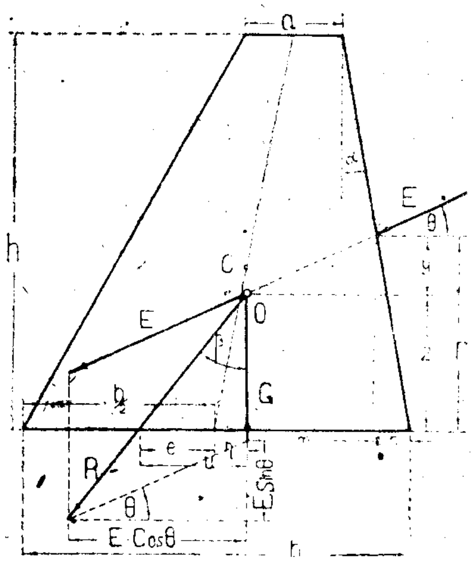
Проверку подпорной стенки как на ее прочность, так и на устойчивость, можно производить, пользуясь обычными формулами прочности и устойчивости.

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.



Фиг. 3.

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:

$$n = r \,\mathrm{tg}\, \alpha$$

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

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

$$z = r - y = r - \left[\frac{b}{2} - r \,\mathrm{tg}\, \alpha - \eta\right] \mathrm{tg} d \qquad (a)$$

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

А. Определение эксцентриситета R.

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

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

где

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

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

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

$$-\frac{b^2+ab-2a^2-2bc-4ac}{6(a+b)}; \qquad (e)$$

после преобразования найдем

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

$$\frac{-h\gamma_k(a-2c)b + 2ah\gamma_k(a+2c)}{6[h\gamma_k(a+b) + 2E\sin\theta]} \qquad (9)$$

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

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

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

$$b - \frac{12Er\cos\theta(1+\mathrm{tg}\,\alpha\,\mathrm{tg}\,\theta) - 6Eb\sin\theta - b^2h\gamma_k -}{h\gamma_k(a+b) + 2E\sin\theta}$$

$$-\frac{h\gamma_k(a-2c)b + 2ah\gamma_k(a+2c)}{h\gamma_k(a+b) + 2E\sin\theta} = 0.$$

Сделав преобразования, придем к квадратному уравнению:

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

Сделаем обозначения:

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

и

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

Тогда уравнение (b) напишется:

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

Откуда:

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

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

С. Определение b из условий устойчивости.

а) На опрокидывание.

$$M_{\text{уд.}} \geqslant \mu M_{\text{опр.}} \qquad (k)$$

На фиг. 3 видно, что

$$M_{\text{опр.}}=E.r\cos\theta-E(b-n)\sin\theta=$$

$$=Er\cos\theta(1+\operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\theta)-Eb\sin\theta \qquad (n)$$

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

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

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

$$-\frac{2a(a+2c)}{4}=0.$$

Обозначив через $p=\dfrac{6\mu E\sin\theta}{h\gamma_k}$ 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

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

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

Формула 11 преобразуется в форм. 7.

b. На сдвиг или скольжение.

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

$$(G+E\sin\theta)f \geqslant mE\cos\theta,$$

Подставив сюда значение G, найдем:

$$\frac{a+b}{2}h\gamma_k f \geqslant mE\cos-Ef\sin\theta,$$

или

$$ah\gamma_k f+bh\gamma_k f \geqslant 2E\cos\theta(m-f\operatorname{tg}\theta),$$

откуда

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

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

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

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 объёмный вес грунта возьмем $\gamma = 1{,}8$ *т/м³*, угол естественного откоса $\varphi = 40°$.

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_1 при обрезе фундамента (фиг. 4), произведем вычисление E на высоту h и воспользуемся при этом формулами аналитического решения [1]).

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

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

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

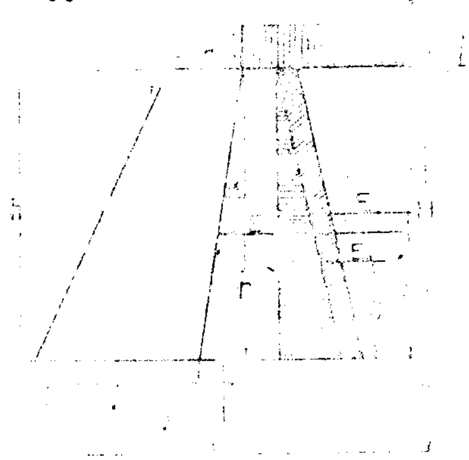
$$\alpha \cong 5°40'\,; \quad \cos\alpha = 0{,}995$$

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

$$E_1 = \frac{1}{2}.6^2.1{,}8\,(0{,}528 - 0{,}1)^2.0{,}995 = 5{,}9\ m.$$

$$E_2 = \frac{2\,q\,E_1}{\gamma\,h} = \frac{2.2}{1{,}8.6}.5{,}9 \cong 2{,}2\ m$$

$$E = 5{,}9 + 2{,}2 = 8{,}1\ m.$$



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 обрезе фундамента до точки приложения силы E.

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

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

$$r = \frac{E_1 r_1 + E_2 r_2}{E} = \frac{5{,}9.2 + 2{,}2.3}{8{,}1} = 2{,}27 \text{ м.}$$

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

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

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

Для нашего случая $b = b_1$; $c = -h\,\mathrm{tg}\,\alpha = -6.0{,}1 = -0{,}6$ *м*

$$b_1 = -\frac{1+0{,}6}{2} + \sqrt{\frac{6.8{,}1.2{,}27}{2{,}3.6} + \frac{1.(5-2.0{,}6)+0{,}6^2}{4}} \cong 2{,}2 \text{ м.}$$

Из условия устойчивости на опрокидывание воспользуемся форм. 7:

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

$$= -\frac{2.1+0{,}6}{4} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{12.1{,}4.8{,}1.2{,}27}{2{,}3.6} + 3.1\,(1-0{,}6) + \frac{0{,}6^2}{4}} = 1{,}8 \text{ м.}$$

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

При определении ширины основания фундамента b_2, определим давление земли на фундамент, как на вертикальную стенку, а величиной k_1 обреза 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:

$$E' = \frac{1}{2}\,\gamma\,H^2\,\mathrm{tg}^2\left[45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right] = \frac{1}{2}.1{,}8.8^2.\mathrm{tg}^2\,(45^\circ - 20^\circ) =$$

$$= 1{,}8.32.0{,}466^2 = 12{,}5 \text{ т.}$$

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

$$e_2 = \frac{2E'}{H} = \frac{2.12{,}5}{8} = 3{,}125 \text{ т/м.}$$

Интенсивность давления грунта по верху фундамента:

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

Давление земли на фундамент от грунта выразится:

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

От равномерно-распределенной нагрузки:
полное на всю высоту —

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

на высоту фундамента h_0 —

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

Интенсивность от равномерно-распределенной нагрузки

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

Полное давление на фундамент:

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

Полная интенсивность давления:

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

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

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

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

Полное давление (на стену с фундаментом):

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

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

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

Определение b_2 — ширины основания фундамента.

Определим величину b_2 из условия сжатия, при допускаемом напряжении на грунт $\sigma_0 = 2{,}5 \ кг/см^2 = 25 \ m/м^3$. 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 $k_1 = 0.3 \ м$, найдем:

$$b = b_2 - (0{,}3 + 2 \cdot 0{,}1) = h_2 - 0{,}5 ; \ c = -H \operatorname{tg} \alpha = -8 \cdot \frac{1}{10} = -0{,}8 \ м.$$

$$b_2 - 0{,}5 = -\frac{2{,}3.0{,}8.8}{2.2{,}5.10} + \sqrt{\frac{6.16{,}2.2{,}62 + 1.2{,}3.8\,(1-2.0{,}8)}{2{,}5.10}} =$$

$$= -0{,}29 + 3{,}12 = 2{,}83 \text{ м};$$

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

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

$$b_2 - 0{,}5 = -\frac{1+0{,}8}{2} + \sqrt{\frac{6.16{,}2.2{,}62}{2{,}3.8} + \frac{1.(5-2.0{,}8)+0{,}8}{4}} =$$

$$= -0{,}9 + 3{,}85 = 2{,}95 \text{ м};$$

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

Определение b_2 из условия опрокидывания (формула 7):

$$b_2 - 0{,}5 = -\frac{2.1+0{,}8}{4} + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{12.1{,}4.16{,}2.2{,}62}{2{,}3.8} + 3.1\,(1-0{,}8) + \frac{0{,}64}{4}} =$$

$$= -0{,}70 + 3{,}15 = 2{,}45 \text{ м}$$

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

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

$$b_2 - 0{,}5 = -\frac{2.1{,}25.16{,}2}{2{,}3.8.0{,}55} - 1 = 4{,}0 - 1 = 3{,}0 \text{ м (без учета отпора)};$$

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

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

Проверка стенки на прочность и устойчивость.

В сечении 1—2 (фиг. 5)

$$M = Er = 8{,}1.2{,}27 = 18{,}4 \ m/м$$

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

$$G_1 = \frac{a+b_1}{2} h\gamma_k + \frac{1+2{,}2}{2}.6.2{,}3 = 22{,}1 \ m,$$

$$W_1 = \frac{db_1^2}{6} = \frac{1.2{,}2^2}{6} = 0{,}807 \text{ м}^3.$$

В точке 1:

$$\sigma_1 = -\frac{18{,}4}{0{,}807} - \frac{23{,}1}{2{,}2}\left[1 - \frac{6.0{,}525}{2{,}2}\right] =$$

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

В точке 2:

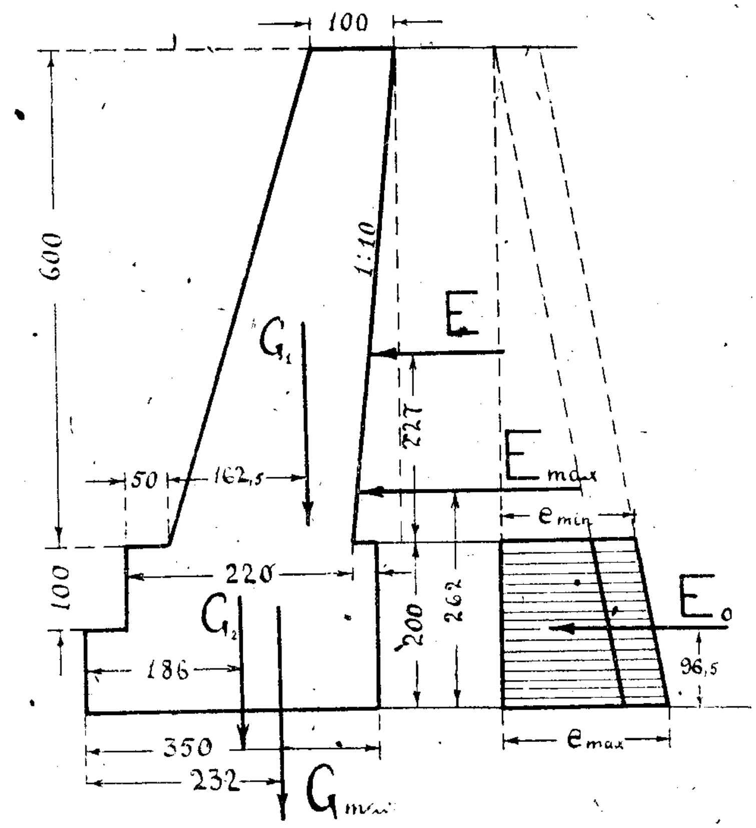
$$\sigma_2 = +22{,}8 - 10\,(1 + 1{,}43) = -1{,}5 \ m/м^2 = -0{,}15 \text{ кг/см}^2 < 0.$$

На опрокидывание:

$$\mu_1 = \frac{G_1\left[\frac{b_1}{2}+\eta\right]}{Er} = \frac{22,1\,(1,1+0,525)}{18,4} = 1,95 > 1,4$$

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:

$$G_2 = G'_2 + G''_2 = 3,5\,.\,1\,.\,2,3 + 3\,.\,1\,.\,2,3 = 8,1 + 6,6 = 14,7 \;\; m$$

Полный вес стены:

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

Расстояние от точки 3 до G_2:

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

Расстояние от той же точки до G_{max}:

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

Эксцентриситет точки приложения G_{max} в основании фундамента:

$$\eta_0 = 2,32 - 1,75 = 0,57 \;\; м$$

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

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

Найдем напряжения:

в точке 3 —

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

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

в точке 4 — $\sigma_4 = 20,8 - 10,5 . 1,98 = -20.8 - 20,8 = 0.$

Проверка на устойчивость всей стенки (вместе с фундаментом)

На опрокидывание:

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

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

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

На сдвиг:

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

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:

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

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

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

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

Эксцентриситет точки приложения R_{max}:

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

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

В точке 3:

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

В точке 4:

$$\sigma_4 = -10,5 . 2 = -21\ m/м^2 = 2,1\ кг/см^2,$$

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.