УДК 624.072.126

Ю.Ф. Суходоев, к.т.н., доц.
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ДВУХСЛОЙНОМ ОСНОВАНИИ КРУГЛОГО ФУНДАМЕНТА*

Отримані рівняння для визначення напружень та переміщень у двошаровій основі круглого фундаменту залежно від товщини верхнього шару та співвідношення модулів деформації обох шарів.

Ключові слова: *модуль деформації ґрунту, двошарова основа.*

Получены уравнения для определения напряжений и перемещений в двухслойном основании круглого фундамента в зависимости от толщины верхнего слоя и соотношения модулей деформации обоих слоев.

Ключевые слова: *модуль деформации грунта, двухслойное основание.*

Equations have been derived for determination of stresses and displacement in the two-layer base of the round foundation depending on the thickness of the upper layer and the ratio of modules of deformation of the both layers.

Keywords: *soil modulus of deformation, two-layer foundation.*

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами. При расчете напряжений и перемещений допускают, что основание сооружения является однородным и линейно-деформируемым телом. Однако, основания сооружений редко бывают однородными. В частности грунты, уплотненными короткими забивными сваями, можно рассматривать при расчете как двухслойное основание.

Анализ последних исследований публикаций, в которых положено начало решения данной проблемы. Исследовано распределение напряжений и перемещений в упругом слое и предложен метод расчета осадки фундамента по схеме линейно-деформируемого слоя конечной толщины [1, 2, 3].

Выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена статья. Результаты этой работы позволяют учитывать при расчете осадки свайных фундаментов деформации грунта межсвайного пространства.

Цель работы – обоснование возможности определения осадки круглого фундамента с учетом соотношения модулей деформаций обоих слоев и толщины верхнего слоя.

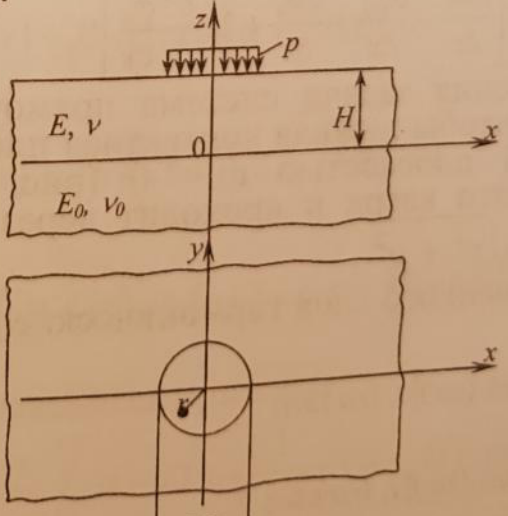

Рисунок 1 – Расчетная схема двухслойного основания

Рассмотрим случай, когда на поверхности первого слоя толщиной H действует осесимметричная нагрузка и этот слой лежит на втором слое, простирающемся в глубину до бесконечности (рис. 1). Решение поставленной

* Работа выполнялась под руководством д.т.н., проф. Егорова К.Е.

задачи можно получить способом, изложенным для основания конечной толщины К.Е. Егоровым [1, 2, 3].

Компоненты перемещений определим, воспользовавшись известными частными решениями дифференциальных уравнений теории упругости:

$$u = \varphi_1 + z\frac{\partial \varphi_4}{\partial x};\ \upsilon = \varphi_2 + z\frac{\partial \varphi_4}{\partial y};\ w = \varphi_3 + z\frac{\partial \varphi_4}{\partial z}. \tag{1}$$

Функции φ_i в равенствах (1) являются гармоническими, так как они удовлетворяют дифференциальному уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial z^2} = 0 \tag{2}$$

и связаны между собой равенством

$$\frac{\partial \varphi_4}{\partial z} = -\frac{1}{3-4\nu}\left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_3}{\partial z}\right). \tag{3}$$

Так как компоненты перемещений известны, компоненты нормальных и касательных напряжений вычисляются с помощью известных из теории упругости равенств:

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\nu}\left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\nu}{1-2\nu}\theta\right); \tag{4}$$

$$\tau_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right), \tag{5}$$

где E – модуль деформации; ν – коэффициент Пуассона; θ – объемная деформация, определяемая равенством

$$\theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \upsilon}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}. \tag{6}$$

Компоненты напряжений σ_z и τ_{xz} выразим через выбранные функции φ_i

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\nu}\left[\frac{\partial \varphi_3}{\partial z} + (1-2\nu)\frac{\partial \varphi_4}{\partial z} + z\frac{\partial^2 \varphi_4}{\partial z^2}\right]; \tag{7}$$

$$\tau_{xz} = \frac{E}{1+\nu}\left[\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} + \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_4}{\partial x} + 2z\frac{\partial^2 \varphi_4}{\partial x\,\partial y}\right]. \tag{8}$$

Для удобства решения задачи система прямоугольных координат выбрана таким образом, чтобы нижняя контактная плоскость первого слоя совпадала с контактной плоскостью $z = 0$ (рис. 1). Положительное направление оси z принято вверх и проходит через центр нагруженной плоскости. При этом $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Для первого уплотненного слоя гармонические функции представим интегралами Фурье:

$$\begin{aligned}
\varphi_1 &= \frac{x}{r}\int_0^\infty \left[A sh(z\alpha) + B ch(z\alpha)\right] I_1(r\alpha)\,d\alpha;\\
\varphi_2 &= \frac{y}{r}\int_0^\infty \left[A sh(z\alpha) + B ch(z\alpha)\right] I_1(r\alpha)\,d\alpha;\\
\varphi_3 &= \int_0^\infty \left[C sh(z\alpha) + D ch(z\alpha)\right] I_0(r\alpha)\,d\alpha;\\
\varphi_4 &= \frac{1}{3-4\nu}\int_0^\infty \left[(B+C)\,sh(z\alpha) + (A+D)\,ch(z\alpha)\right] I_0(r\alpha)\,d\alpha,
\end{aligned} \tag{9}$$

где $sh(z\alpha)$, $ch(z\alpha)$ – гиперболические синусы и косинусы аргумента $(z\alpha)$; $I_0(r\alpha)$, $ch(z\alpha)$ – функция Бесселя первого рода нулевого и первого порядка аргумента $(r\alpha)$; $r\alpha = \alpha\sqrt{x^2+y^2}$ – расстояние от оси симметрии z до рассматриваемой точки, лежащей на горизонтальной плоскости; A, B, C, $Д$ – коэффициенты, зависящие от переменного интегрирования α, определяются из заданных граничных условий; при этом предполагается, что граничные условия задачи симметричны относительно координатной вертикальной оси z; в частности, симметричному распределению соответствует равномерная вертикальная нагрузка по площади круга.

Для второго слоя, который представляется в виде упругого полупространства, эти же гармонические функции должны быть выбраны так, чтобы выполнялись следующие условия:

а. Компоненты перемещений $(u,\ \upsilon,\ w)$ должны равняться нулю при $z \to (-\infty)$. Тогда $A_0 = B_0$ и $C_0 = Д_0$.

б. Касательные напряжения тождественно равны нулю при $z = 0$.

Таким образом, для второго слоя можно записать:

$$\varphi_1 = \frac{x}{r}\int_0^\infty B_0\, e^{z\alpha}\, I_1(r\alpha)\, d\alpha;\quad \varphi_2 = \frac{y}{r}\int_0^\infty B_0\, e^{z\alpha}\, I_1(r\alpha)\, d\alpha;$$

$$\varphi_3 = \int_0^\infty D_0\, e^{z\alpha}\, I_0(r\alpha)\, d\alpha;\quad \varphi_4 = \frac{1}{3-4\nu}\int_0^\infty (B_0 + D_0)\, e^{z\alpha}\, I_0(r\alpha)\, d\alpha. \tag{10}$$

Предполагается, что на контактной плоскости двух слоев, имеющих соответственно модули деформации E и E_0 и коэффициенты Пуассона ν и ν_0, трение отсутствует. Это условие удовлетворяется, если равенство (8) приравнять нулю при $z = 0$, то есть

$$\left[\frac{\partial\varphi_1}{\partial z} + \frac{\partial\varphi_3}{\partial x} + \frac{\partial\varphi_4}{\partial x}\right]_{z=0} = 0. \tag{11}$$

Из равенств (9) имеем:

$$\frac{\partial\varphi_1}{\partial z} = \frac{x}{r}\int_0^\infty \left[A ch(z\alpha) + B sh(z\alpha)\right]\alpha\, I_1(r\alpha)\, d\alpha$$

$$\frac{\partial\varphi_3}{\partial z} = \frac{x}{r}\int_0^\infty \left[C sh(z\alpha) + D ch(z\alpha)\right]\alpha\, I_0(r\alpha)\, d\alpha \tag{12}$$

$$\frac{\partial\varphi_4}{\partial x} = \frac{1}{3-4\nu}\cdot\frac{x}{r}\int_0^\infty \left[(B+C)\, sh(z\alpha) + (A+D)\, ch(z\alpha)\right]\alpha\, I_0(r\alpha)\, d\alpha.$$

Суммируем эти равенства при $z = 0$

$$\left[\frac{\partial\varphi_1}{\partial z} + \frac{\partial\varphi_3}{\partial x} + \frac{\partial\varphi_4}{\partial y}\right]_{z=0} = \frac{x}{r}\int_0^\infty \left[A - D + \frac{1}{3-4\nu}(A+D)\right]\alpha\, I_1(r\alpha)\, d\alpha = 0$$

Чтобы это равенство равнялось нулю, достаточно приравнять нулю подинтегральное выражение, то есть

$$A - D + \frac{1}{3-4\nu}(A+D) = 0 \quad \text{или} \quad A = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\cdot D. \tag{13}$$

Выполнив аналогичные преобразования для второго слоя, используя равенство (10), получим

$$B_0 = \frac{1-2\nu_0}{2\left(1-\nu_0\right)} \cdot D_0 . \tag{14}$$

Исходя из условия совместности деформаций на контактной поверхности двух слоев вертикальные напряжения и перемещения равны, то есть при $z = 0$

$\sigma_{1z} = \sigma_{2z}$ и $w = w_0$.

Используя равенство (7), запишем

$$\frac{E}{1+\nu}\left[\frac{\partial \varphi_3}{\partial z} + \left(1-2\nu\right)\frac{\partial \varphi_4}{\partial z}\right]_{z=0} = \frac{E_0}{1+\nu_0}\left[\frac{\partial \varphi_3}{\partial z} + \left(1-2\nu_0\right)\frac{\partial \varphi_4}{\partial z}\right]_{z=0} . \tag{15}$$

Для первого слоя согласно равенству (9) имеем

$$\begin{gathered}\frac{\partial \varphi_3}{\partial z} = \int\limits_0^\infty \left[C ch\left(z\alpha\right) + D sh\left(z\alpha\right)\right] \alpha I_0\left(r\alpha\right) d\alpha ;\\ \frac{\partial \varphi_4}{\partial z} = -\frac{1}{3-4\nu} \int\limits_0^\infty \left[\left(B+C\right) ch\left(z\alpha\right) + \left(A+D\right) sh\left(z\alpha\right)\right] \alpha I_0\left(r\alpha\right) d\alpha .\end{gathered} \tag{16}$$

Для второго слоя согласно равенству (10) имеем

$$\begin{gathered}\frac{\partial \varphi_3}{\partial z} = \int\limits_0^\infty D_0\, e^{z\alpha}\, I_0\left(r\alpha\right) \alpha\, d\alpha ;\\ \frac{\partial \varphi_4}{\partial z} = -\frac{1}{3-4\nu_0} \int\limits_0^\infty \left(B_0 + D_0\right) e^{z\alpha}\, I_0\left(r\alpha\right) \alpha\, d\alpha .\end{gathered} \tag{17}$$

Согласно равенству (15), используя равенства (16) и (17), после некоторых преобразований запишем

$$\begin{gathered}\frac{E}{1+\nu_0} \int\limits_0^\infty \left[C - \frac{1-2\nu}{3-4\nu}\left(B+C\right)\right] I_0\left(r\alpha\right) \alpha\, d\alpha = \\ = \frac{E_0}{1+\nu_0} \int\limits_0^\infty \left[D_0 - \frac{1-2\nu_0}{3-4\nu_0}\left(B_0 + D_0\right)\right] I_0\left(r\alpha\right) \alpha\, d\alpha .\end{gathered} \tag{18}$$

Из равенства (14) имеем

$$B_0 + D_0 = \left[1 + \frac{1-2\nu_0}{2\left(1-\nu_0\right)}\right] D_0 = \frac{3-4\nu_0}{2\left(1-\nu_0\right)} D_0$$

или

$$D_0 - \frac{1-2\nu_0}{3-4\nu_0}\left(B_0 + D_0\right) = \frac{1}{2\left(1-\nu_0\right)} D_0 .$$

Поэтому равенство (18) примет вид:

$$\frac{E\left(1-\nu_0^2\right)}{E_0\left(1-\nu^2\right)} \int\limits_0^\infty \left(1-\nu\right)\left[C - \frac{1-2\nu}{3-4\nu}\left(B+C\right)\right] I_0\left(r\alpha\right) \alpha\, d\alpha = \frac{1}{2} \int\limits_0^\infty D_0\, I_0\left(r\alpha\right) \alpha\, d\alpha .$$

Откуда

$$D_0 = 2n(1-\nu)\left[C - \frac{1-2\nu}{3-4\nu}(B+C)\right].$$

Кроме того, равенство $w = w_0$ даст $D = D_0$. Окончательно имеем:

$$D = \frac{2n(1-\nu)}{3-4\nu}\left[2(1-\nu)C - (1-2\nu)B\right], \tag{19}$$

где

$$n = \frac{E\left(1-\nu_0^2\right)}{E_0\left(1-\nu^2\right)}. \tag{20}$$

Значение n является главным параметром в расчете двухслойного основания. Если n больше либо меньше единицы, то это значит, что верхний слой грунта двухслойного основания соответственно обладает большей либо меньшей плотностью по сравнению с подстилающим. Для однородного основания $n = 1$.

На границе первого слоя при $z = H$ предполагается, что трение под фундаментом отсутствует и нормальное вертикальное давление σ_z равно заданной нагрузке. При равномерно распределенной нагрузке по площади круга радиусом R согласно интегральной формуле имеем:

$$F(r) = R \cdot p \int_0^\infty I_1(R\alpha) I_0(r\alpha)\, d\alpha. \tag{21}$$

Согласно равенству (8) в случае отсутствия трения под нагрузкой запишем:

$$\left[\frac{\partial\varphi_1}{\partial z} + \frac{\partial\varphi_3}{\partial x} + \frac{\partial\varphi_4}{\partial x} + 2z\frac{\partial^2\varphi_4}{\partial x\,\partial z}\right]_{Z=H} = 0. \tag{22}$$

Дополняя равенства (12) еще одним равенством

$$\frac{\partial^2\varphi_4}{\partial x\,\partial z} = \frac{1}{3-4\nu}\frac{x}{r}\int_0^\infty \left[(B+C)ch(z\alpha) + (A+D)sh(z\alpha)\right] I_1(r\alpha)\alpha^2\, d\alpha,$$

на основе равенства (22) получим:

$$Ach(H\alpha) + Bsh(H\alpha) - Csh(H\alpha) - Dch(H\alpha) + \frac{1}{3-4\nu} + \left[(B+C)sh(H\alpha) + \right.$$

$$\left. + (A+D)ch(H\alpha)\right] + \frac{2H\alpha}{3-4\nu}\left[(B+C)ch(H\alpha) + (A+D)sh(H\alpha)\right] = 0.$$

Откуда

$$\begin{aligned}&\left[(A-D)(3-4\nu) + (A+D) + 2H\alpha(B+C)\right]ch(H\alpha) + \\ &+\left[(B-C)(3-4\nu) + (B+C) + 2H\alpha(A+D)\right]sh(H\alpha) = 0.\end{aligned} \tag{23}$$

Согласно равенству (13) имеем:

$$A + D = \frac{3-4\nu}{2(1-\nu)}D; \qquad A - D = -\frac{1}{2(1-\nu)}D;$$

откуда

$(3-4\nu)(A-D) + (A+D) = 0.$

Тогда равенство (23) примет вид:

$$2H\alpha\,(B+C)\,ch\,(H\alpha)+\left[(3-4\nu)(B-C)+(B+C)+\right.$$
$$\left.+\,2H\alpha\,(A+D)\right]sh\,(H\alpha)=0\,. \tag{24}$$

Из равенства (19) следует

$$B+C=\frac{3-4\nu}{1-2\nu}\left(C-\frac{D}{2n\,(1-\nu)}\right);\quad B-C=\frac{1}{1-2\nu}\left(C-\frac{(3-4\nu)\,D}{2n\,(1-\nu)}\right).$$

Кроме того, равенство (13) дает:

$$A+D=\frac{3-4\nu}{2\,(1-\nu)}\,D\,. \tag{25}$$

Из равенства (24) следует

$$C=\frac{(H\alpha)\,ch\,(H\alpha)+\left[2\,(1-\nu)-n\,(1-2\nu)\,(H\alpha)\right]sh\,(H\alpha)}{2n\,(1-\nu)\left[sh\,(H\alpha)+(H\alpha)\,ch\,(H\alpha)\right]}\,D\,. \tag{26}$$

Теперь остается определить коэффициент D исходя из равенств вертикальных напряжений на границе первого слоя, то есть $\sigma_z=F\,(r)$.

Вертикальное напряжение σ_z определяется из равенства (7)

$$\sigma_z=\frac{E}{1+\nu}\left[\frac{\partial\varphi_3}{\partial z}+(1-2\nu)\frac{\partial\varphi_4}{\partial z}+z\,\frac{\partial^2\varphi_4}{\partial z^2}\right]_{Z=H}=\frac{E}{1+\nu}\int_0^\infty\{C sh\,(H\alpha)+$$
$$+\,D sh\,(H\alpha)-\frac{1-2\nu}{3-4\nu}\left[(B+C)\,ch\,(H\alpha)+(A+D)\,sh\,(H\alpha)\right]-$$
$$-\frac{H\alpha}{3-4\nu}\left[(B+C)\,sh\,(H\alpha)+(A+D)\,ch\,(H\alpha)\right]\}\,.$$

$$I_0\,(r\alpha)\,\alpha\,d\alpha=\frac{E}{(1+\nu)(3-4\nu)}\int_0^\infty\{\left[(3-4\nu)\,C-(1-2\nu)\,(B+C)-\right.$$
$$\left.-\,(H\alpha)\,(A+D)\right]ch\,(H\alpha)+\left[(3-4\nu)\,D-(1-2\nu)\,(A+D)-\right.$$
$$\left.-\,(H\alpha)\,(B+C)\right]sh\,(H\alpha)\}\,I_0\,(r\alpha)\,\alpha\,d\alpha=\frac{E}{2n\left(1-\nu^2\right)}\cdot$$
$$\cdot\int_0^\infty\frac{sh\,(H\alpha)\,ch\,(H\alpha)+H\alpha+n\left(sh^2\,(H\alpha)-(H\alpha)^2\right)}{sh\,(H\alpha)+(H\alpha)\,ch\,(H\alpha)}\cdot D\alpha\,I_0\,(r\alpha)\,d\alpha\,.$$

Приравнивая это равенство соотношению (21), получаем коэффициент D:

$$D=\frac{2n\left(1-\nu^2\right)}{E}Rp\,\frac{I_1\,(R\alpha)}{\alpha}\,\frac{sh\,(H\alpha)+(H\alpha)\,ch\,(H\alpha)}{sh\,(H\alpha)\,ch\,(H\alpha)+(H\alpha)-n\left[sh^2(H\alpha)-(H\alpha)^2\right]}\,. \tag{27}$$

Остальные коэффициенты A, B, C выражаются через коэффициент D. В частности, имеем:

$$C=\frac{1+\nu}{E}\,Rp\,\frac{I_1\,(R\alpha)}{\alpha\,\Delta}\{(H\alpha)\,ch\,(H\alpha)+\left[2\,(1-\nu)-(1-2\nu)\,n\,H\alpha\right]sh\,(H\alpha)\}$$

$$B+C=\frac{(1+\nu)(3-4\nu)}{E}\,Rp\,\frac{I_1\,(R\alpha)}{\alpha\,\Delta}(1-n\,H\alpha)\,sh\,(H\alpha) \tag{28}$$

$$A+D=\frac{n\,(1+\nu)(3-4\nu)}{E}\,Rp\,\frac{I_1\,(R\alpha)}{\alpha\,\Delta}\left[sh\,(H\alpha)+(H\alpha)\,ch\,(H\alpha)\right],$$

где

$$\Delta = sh(H\alpha)\,ch(H\alpha) + (H\alpha) + n\left[sh^2(H\alpha) - (H\alpha)^2\right] \tag{29}$$

$$n = \frac{E\left(1-\nu_0^2\right)}{E_0\left(1-\nu^2\right)}. \tag{30}$$

Компоненты вертикальных напряжений имеют вид ($H\alpha = \beta$):

Для первого слоя

$$\sigma_{1Z} = \frac{Rp}{H}\int_0^\infty \left\{\left(sh\beta + \beta\,ch\beta\right)\left(1 - n\frac{Z}{H}\beta\right)ch\left(\frac{Z}{H}\beta\right) + \left[n\left(sh\beta + \beta\,ch\beta\right) - \right.\right.$$

$$\left.\left. -\left(1-n\beta\right)\frac{Z}{H}\beta\,sh\beta\right]sh\left(\frac{Z}{H}\beta\right)\right\}\frac{I_1\left(\frac{R}{H}\beta\right)I_0\left(\frac{r}{H}\beta\right)}{\Delta}\,d\beta. \tag{31}$$

Для второго слоя

$$\sigma_{2Z} = \frac{Rp}{H}\int_0^\infty \left(sh\beta + \beta\,ch\beta\right)\left(1 - \frac{Z}{H}\beta\right)e^{\frac{Z}{H}\beta}\cdot\frac{I_1\left(\frac{R}{H}\beta\right)I_0\left(\frac{r}{H}\beta\right)}{\Delta}\,d\beta\,. \tag{32}$$

На контактной плоскости двух слоев при $z = 0$ имеем:

$$\sigma_Z = \sigma_{1Z} = \sigma_{2Z} = \frac{Rp}{H}\int_0^\infty \left(sh\beta + \beta\,ch\beta\right)\frac{I_1\left(\frac{R}{H}\beta\right)I_0\left(\frac{r}{H}\beta\right)}{\Delta}\,d\beta\,. \tag{33}$$

Компоненты вертикальных перемещений имеют вид:

Для первого слоя

$$W_1 = Rp\frac{1+\nu}{E}\int_0^\infty \left\{\left[2n\left(1-\nu\right)\left(sh\beta + \beta\,ch\beta\right) - \left(1-n\beta\right)\frac{Z}{H}\beta\,sh\beta\right]\cdot\right.$$

$$\cdot ch\left(\frac{Z}{H}\beta\right) + \left[\left(1-2\nu\right)\left(1-n\beta\right)sh\beta + \left(sh\beta + \beta\,ch\beta\right)\left(1 - n\frac{Z}{H}\beta\right)\right]\cdot$$

$$\left. sh\left(\frac{Z}{H}\beta\right)\right\}\cdot\frac{I_1\left(\frac{R}{H}\beta\right)I_0\left(\frac{r}{H}\beta\right)}{\Delta\beta}\,d\beta\,. \tag{34}$$

Для второго слоя

$$W_2 = Rp\frac{1+\nu_0}{E_0}\int_0^\infty \left[2\left(1-\nu_0\right) - \frac{Z}{H}\beta\right]\left(sh\beta + \beta\,ch\beta\right)e^{\frac{Z}{H}\beta}\,\cdot$$

$$\cdot\frac{I_1\left(\frac{R}{H}\beta\right)I_0\left(\frac{r}{H}\beta\right)}{\Delta\beta}\,d\beta. \tag{35}$$

Осадка поверхности первого слоя при $z = H$ определяется формулой:

$$W = \left(W_1\right)_{Z=H} = \frac{2Rp\left(1-\nu^2\right)}{E}\int_0^\infty \left[sh^2\beta + n\left(\beta + sh\beta\,ch\beta\right)\right]\cdot$$

$$\cdot I_1\left(\frac{R}{H}\beta\right)I_0\left(\frac{r}{H}\beta\right)\frac{d\beta}{\Delta\beta}. \tag{36}$$

Для определения осадки жесткого штампа достаточно взять в пределах равномерно распределенной нагрузки по кругу среднее значение

$$S_{cp} = \frac{\int\limits_0^{2\pi}\int\limits_0^{R} w(r)\, r dr\, d\varphi}{\pi R^2} = \frac{4\left(1-\nu^2\right) pH}{E}\cdot \tag{37}$$

$$\cdot \int\limits_0^{\infty} \left[sh^2\beta + n\left(\beta + sh\beta\, ch\beta\right)\right] I_1^2\left(\frac{R}{H}\beta\right)\frac{d\beta}{\beta^2\Delta},$$

где

$$\Delta = \left(\beta + sh\beta\, ch\beta\right) + n\left(sh^2\beta - \beta^2\right).$$

Выводы.

1. Соотношение модулей деформаций двух слоев является главным параметром в расчете двухслойного основания.

2. Полученная формула для определения осадки жесткого круглого штампа на двухслойном основании учитывает как соотношение модулей деформаций двух слоев, так и толщину верхнего слоя.

Литература

1. Егоров, К.Е. Распределение напряжений и перемещений в двухслойном основании ленточного фундамента / К.Е. Егоров // Свайные и естественные основания. – 1939. – №10. – С. 99 – 114.

2. Егоров, К.Е. К вопросу деформации основания конечной толщины / К.Е. Егоров // Механика грунтов. Вип. 34. – М.: Госстройиздат, 1958. – С. 12 – 29.

3. Егоров, К.Е. Распределение напряжений и перемещений в основании конечной толщины / К.Е. Егоров // Механика грунтов. Вип. 43. – М.: Госстройиздат, 1961. – С. 13 – 31.

Надійшла до редакції 20.09. 2010