УДК 624.131+539.215

РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

[1]Юнусов А.А., [2]Дасибеков А., [1]Корганбаев Б.Н.

[1]Международный гуманитарно-Технический Университет, Шымкент;
[2]Южно-казахстанский государственный университет имени М. Ауэзова, Шымкент,
e-mail: Yunusov1951@mail.ru

В данной работе дана общая методика расчета грунтовых оснований с учетом нелинейной ползучести и неоднородности самого грунта. Причем скелет грунта подчиняется нелинейной теории Малова-Арутюняна. Неоднородность грунта учитывается между коэффициентом пористости и суммой главных напряжений. Функции, характеризующие упруго-мгновенную деформацию и деформацию ползучести скелета грунта зависят от пространственных координат. В качестве примера рассмотрено решение одномерной задачи консолидации неоднородных упругоползучих грунтов, где требуется определить напряжение в скелете грунта σ(z, t), давление в поровой жидкости p(z, t) и величину осадки S(t) уплотняемого массива неоднородного упругоползучего грунта конечной мощности. Расчетной схемой является слой грунта мощностью h в момент времени $t = \tau_1$, он подвержен действию распределенной нагрузки с интенсивностью q(z, t). Верхняя поверхность уплотняемого массива водопроницаема, а нижняя водонепроницаема. Получены расчетные формулы для вычисления напряжений в скелете грунта, порового давления и осадок уплотняемого грунтового массива.

Ключевые слова: Оценка, уравнение в интегральной форме, процесс,уплотнение, грунт, прямоугольник, давление, основание, фундамент, граничные условия

THE CALCULATION OF NONLINEAR CONSOLIDATION GROUND BASES

[1]Yunusov A.A., [2]Dasibekov A., [1]Korgonbaev B.N.

[1]International gumj-technical universiny, Shymkent;
[2]M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent, e-mail:Yunusov1951@mail.ru

In this work the General method of calculating soil foundations considering nonlinear creep and heterogeneity of the soil. Moreover, the soil skeleton obeys the nonlinear theory Malova-Harutyunyan. The heterogeneity of soil are accounted between the porosity and the sum of the principal stresses. Functions characterizing the elastic instantaneous deformation and creep deformation of the soil skeleton depend on spatial coordinates. As an example, the solution of the one-dimensional problem of the consolidation of heterogeneous uprugosti soils, where it is required to determine the stress in the soil skeleton , the pressure in the pore fluid and the amount of non-cohesive sediments heterogeneous array provodolzhala soil the ultimate power. Design scheme is a layer of soil capacity at the time , he is exposed to the action of distributed load with intensity. The upper surface of the sealing array of water-permeable, and waterproof bottom. Formulas for computing the stresses in the soil skeleton, pore pressure and sediment compacted soil mass.

Keywords: Estimation, equation in the integral form, process ,compaction, soil, rectangle, pressure, basis, Foundation, boundary conditions

Если неоднородная грунтовая среда в общем случае обладает свойством нелинейной ползучести, то зависимость между коэффициентом пористости и суммой главных напряжений в общем виде имеет вид

$$\varepsilon(x,y,z,t)=\varepsilon(\tau_1)-\frac{a_0(x,y,z,t)}{1+(n-1)\xi}\theta(x,y,z,t)+$$

$$+\frac{1}{1+(n-1)\xi}\int_{\tau_1}^{t}\theta(x,y,z,\tau)\frac{\partial a_0(x,y,z,\tau)}{\partial\tau}d\tau+$$

$$+\frac{1}{1+(n-1)\xi}\int_{\tau_1}^{t}f[\theta(x,y,z,\tau)]\frac{\partial C(t,\tau)}{\partial\tau}d\tau,\quad(1)$$

где

$$C(t,\tau)=\phi(\tau)\cdot a_1[1-e^{-\gamma_1(t-\tau)}];\qquad(2)$$

$\varepsilon(t)$, $\theta(t)$ – эти функции также изменяются по координатам x, y, z; $f[\theta(\tau)]$ – функция, характеризующая нелинейную зависимость между коэффициентом пористости $\varepsilon(t)$ и суммой главных напряжений $\theta(t)$ в скелете грунта; $\varphi(\tau)$ – функция старения; a_1, γ_1 – параметры ползучести; τ_1 – момент приложения внешней нагрузки; ξ – коэффициент бокового давления; a_0 – коэффициент сжимаемости грунта, который в общем виде может зависеть от глубины исследуемой точки и времени; n – размерность рассматриваемой задачи; $C(t, \tau)$ – мера ползучести. Причем здесь функция $f[\theta(\tau)]$ может изменяться в виде

$$f[\theta(t)]=\theta(t)+\mu\theta^m(t),\qquad(3)$$

где μ – малый параметр.

Зависимость (1) при постоянных коэффициентах для одномерной задачи теории уплотнения однородных грунтов впервые была применена В.А. Флориным [6]. Он теорию упругоползучего тела Г.Н. Маслова-Н.Х. Арутюняна [1] смог применить к описанию процесса уплотнения глинистых грунтов, обладающих свойством ползучести. Экспериментальные исследования С.Р. Месчяна [4] доказали применимость этой теории к глинистым грунтам.

Функция старения $\varphi(\tau)$, в (2), обычно представляется в виде [1, 6].

$$\phi(\tau) = C_0 + \frac{A_1}{\tau}. \tag{4}$$

Здесь C_0, A_1 – опытные данные, τ – время приложения нагрузки.

Функции a_0 и $C(t, \tau)$, характеризующие упруго-мгновенную деформацию и деформацию ползучести скелета грунта зависят от пространственных координат. Следовательно, выражение (1) можно представить так:

$$\left[\varepsilon_0 - \varepsilon(x,y,z,t)\right]\left[1+(n-1\xi)\right] = a_0(x,y,z,t)\theta(x,y,z,t) -$$

$$-\int_{\tau_1}^{t}\theta(x,y,z,\tau)\frac{\partial a_0(x,y,z,\tau)}{\partial\tau}d\tau - \int_{\tau_1}^{t} f\left[\theta(x,y,z,\tau)\right]\frac{\partial C(\tau,t)}{\partial\tau}d\tau +$$

$$+\alpha_i\,\eta(x,y,z)\left[\theta(x,y,z,t)a(t) - \int_{\tau_1}^{t}\theta(x,y,z,\tau)\frac{\partial a_0(\tau)}{\partial\tau}d\tau - \frac{\beta_H}{\alpha_H}\int_{\tau_1}^{t} f\left[\theta(x,y,z,\tau)\right]\frac{\partial C(\tau,t)}{\partial\tau}d\tau\right], \tag{5}$$

где

$$a_0(x,y,z,t) = a_0(t)\cdot\left[1+\alpha_H\eta(x,y,z)\right]; \tag{6}$$

$$C(x,y,z,\tau,t) = C(\tau,t)\cdot\left[1+\beta_H\eta(x,y,z)\right]; \tag{7}$$

$\eta(x,y,z)$ – функция пространственных координат, отражающая неоднородность грунта; α_H и β_H – параметры неоднородности, характеризующие упруго-мгновенную и ползучую деформации.

Выражение (5) при (6),(7) определяет изменение коэффициента пористости грунта в зависимости от суммы главных напряжений. Этим соотношением можно описать любое состояние скелета грунта. Если $\alpha_H = 0$, то имеем дело с нелинейной задачей однородного грунта. Когда $f[\theta(x,y,z,t)] = \theta(x,y,z,t)$ задача сводится к линейному состоянию грунта. Если $\alpha_H = 0$ и $f[\theta(x,y,z,t)] = \theta(x,y,z,t)$, то однородному состоянию грунта соответствует линейно-ползучее. Когда $\alpha_H = 0$, $t = \tau_1$ состояние грунта упругое.

Процесс уплотнения трехфазной земляной среды без учета вязких свойств скелета и переменности коэффициента фильтрации согласно [6] описывается следующим образом

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + \beta^{/}\left(1+\varepsilon_{cp}\right)\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa\gamma_B^{-1}(1+\varepsilon_{cp})\nabla^2 p, \tag{8}$$

где – оператор Лапласа; $\varepsilon_{ср}$ – средний коэффициент пористости; $\beta^{/}$ и κ – коэффициент объемного сжатия и фильтрации; $\gamma_В$ – объемный вес воды; p – давление в поровой жидкости.

Учитывая соотношения (5) – (7) уравнение (8) приводим к следующему виду:

$$a_0(t)\frac{\partial}{\partial t}\theta(x,y,z,t) - f\left[\theta(x,y,z,t)\right]\cdot\frac{\partial C(\tau,t)}{\partial\tau}\Big|_{t=\tau_1} - \int_{\tau_1}^{t} f\left[\theta(x,y,z,\tau)\right]\frac{\partial^2 C(\tau,t)}{\partial\tau\partial t}d\tau +$$

$$+\alpha_H\eta(x,y,z)\cdot\left[a_0(t)\frac{\partial}{\partial t}\theta(x,y,z,t) - \frac{\beta_H}{\alpha_H}f\left[\theta(x,y,z,t)\right]\frac{\partial C(\tau,t)}{\partial\tau}\Big|_{t=\tau_1} -\right.$$

$$\left.-\frac{\beta_H}{\alpha_H}\int_{\tau_1}^{t} f\left[\theta(x,y,z,\tau)\right]\frac{\partial^2 C(\tau,t)}{\partial\tau}d\tau\right] -$$

$$-\beta^{/}\left(1+\varepsilon_{cp}\right)\left[1+(n-1)\xi\right]\cdot\frac{\partial p}{\partial t} = -k\left(1+\varepsilon_{cp}\right)\left[1+(n-1)\xi\right]\nabla^2 p. \tag{9}$$

Если учесть соотношение [6], т.е.

$$\theta(t) = \theta^* + np^* - np(t), \tag{10}$$

то уравнение (9) приводится к виду:

$$A_0 \frac{\partial}{\partial t}\theta(x,y,z,t) - f\left[\theta(x,y,z,t)\right]\cdot \frac{\partial C(\tau,t)}{\partial \tau}\Big|_{t=\tau} - \int_{\tau_1}^{t} f\left[\theta(x,y,z,\tau)\right]\frac{\partial^2 C(\tau,t)}{\partial\tau\partial t}d\tau +$$

$$+\alpha_H \eta(x,y,z)\cdot\left[a_0 \frac{\partial}{\partial t}\theta(x,y,z,t) - \frac{\beta_H}{\alpha_H} f\left[\theta(x,y,z,t)\right]\frac{\partial C(\tau,t)}{\partial\tau}\Big|_{t=\tau_1} - \right.$$

$$\left. - \frac{\beta_H}{\alpha_H}\int_{\tau_1}^{t} f\left[\theta(x,y,z,\tau)\right]\frac{\partial^2 C(\tau,t)}{\partial\tau\partial t}d\tau\right] =$$

$$= C_V \nabla^2 W_k(x,y,z,t). + F_{k-1}, \tag{11}$$

где θ^* и p^* – сумма главных напряжений и давление в поровой жидкости для стабилизированного состояния грунта;

$$A_0 = a_0 + \beta^{/}\left(1+\varepsilon_{cp}\right)n^{-1}\left[1+(n-1)\xi\right];$$

$$C_{\text{V}} = k\left(1+\varepsilon_{cp}\right)\left(n\gamma_B\right)^{-1}\left[1+(n-1)\xi\right]. \tag{12}$$

Дальнейшим функцию $f[\theta(x,y,z,t)]$ примем в виде полинома (3). Выражение (3) подставив в (11), затем решение полученного уравнения ищем в виде

$$\theta(x,y,z,t) = \sum_{k=0}^{\infty} W_k(x,y,z,t)\mu^k. \tag{13}$$

Тогда решение нелинейного интегро-дифференциального уравнения консолидации земляных масс (11) при (12) и (13) сводится к определению интегралов следующей системы линейных уравнений:

$$A_0 \frac{\partial}{\partial t}W_k(x,y,z,t) - W_k(x,y,z,t)\frac{\partial C(\tau,t)}{\partial\tau}\Big|_{t=\tau} - \int_{\tau_1}^{t} W_k(x,y,z,\tau)\frac{\partial^2 C(\tau,t)}{\partial\tau\partial t}d\tau +$$

$$+\alpha_H \eta(x,y,z)\cdot\left[a_0\frac{\partial}{\partial t}W_k(x,y,z,t) - \frac{\beta_H}{\alpha_H}W_k(x,y,z,t)\frac{\partial C(\tau,t)}{\partial\tau}\Big|_{t=\tau_1} - \right.$$

$$\left. - \frac{\beta_H}{\alpha_H}\int_{\tau_1}^{t} W_k(x,y,z,\tau)\frac{\partial C^2(\tau,t)}{\partial\tau\partial t}d\tau\right] =$$

$$= C_V\nabla^2 W_k(x,y,z,t) + F_{k-1}, \tag{14}$$

где

$$F_{-1} = 0;\ F_0 = W_0^2;$$

$$F_k = \frac{1}{kW_0}\sum_{n=1}^{\infty}(nm-k+n)W_n F_{k-n} \text{ при } m \ge 1.$$

Таким образом, исследование нелинейной задачи механики уплотняемых неоднородных глинистых грунтов с учетом их ползучести при такой постановке сводится к решению линейных интегро-дифференциальных уравнений (14)

Следует заметить, что основное уравнение консолидации (11) получено в неявной форме по отношению к мере ползучести $C(t, \tau)$. В зависимости от $C(t, \tau)$ уравнения (14) естественно будет иметь различный вид. В данной работе в качестве этой функции примем следующее выражение:

$$C(t,\tau) = a_1[1 - e^{-\gamma_1(t-\tau)}],$$

тогда

$$\frac{\partial}{\partial t}C(t,\tau)\Big|_{t=\tau} = -a_1\gamma_1;$$

$$\frac{\partial^2}{\partial\tau\partial t}C(t,\tau) = -a_1\gamma_1^2 e^{-\gamma_1(t-\tau)}.$$

Подставив эти выражения в (14), получим реккурентную систему интегро-дифференциальных уравнений вида:

$$A_0\frac{\partial}{\partial t}W_k(x,y,z,t)+W_k(x,y,z,t)-a_1\gamma_1^2\int_{\tau_1}^{t}W_k(x,y,z,\tau)e^{-\gamma_1(t-\tau)}d\tau+$$

$$+\alpha_H\eta(x,y,z)\cdot\left[a_0\frac{\partial}{\partial t}W_k(x,y,z,t)+\frac{\beta_H}{\alpha_H}a_1\gamma_1W_k(x,y,z,t)-\frac{\beta_H}{\alpha_H}a_1\gamma_1^2\int_{\tau_1}^{t}W_k(x,y,z,\tau)e^{-\gamma_1(t-\tau)}d\tau\right]=$$

$$=C_V\nabla^2W_k(x,y,z,t)+F_k^H,k=0,1,2,... \qquad (15)$$

где

$$F_0^H=C_V\beta/\gamma_B\cdot\frac{\partial}{\partial}\left(\frac{\theta^*}{tn}+p^*\right);\ F_1^H=a_1\gamma_1^2\int_{\tau_1}^{t}W_0^ne^{-\gamma_1(t-\tau_1)}d\tau-a_1\gamma_1W_0^n+\alpha_H\eta(x,y,z)\times$$

$$\times\left\{\frac{\beta_H}{\alpha_H}a_1\gamma_1^2\int_{\tau_1}^{t}W_0^ne^{-\gamma_1(t-\tau_1)}d\tau-\frac{\beta_H}{\alpha_H}a_1\gamma_1W_0^n\right\};$$

$$F_\kappa^H=a_1\gamma_1^2\int_{\tau_1}^{t}F_{\kappa-1}e^{-\gamma_1(t-\tau_1)}d\tau-a_1\gamma_1F_{\kappa-1}-\beta_Ha_1\gamma_1\eta(x,y,z)\left\{\gamma_1\int_{\tau_1}^{t}F_{\kappa-1}e^{-\gamma_1(t-\tau_1)}d\tau-F_{\kappa-1}\right\}.$$

Итак, пусть требуется найти непрерывные функции W_k, удовлетворяющие в области $\overline{\Omega}=\{M\in\overline{G},t\geq\tau_1\}$ системе линейных дифференциальных уравнений (15) и краевым условиям общего вида

$$W_0(M,t)/_{t=\tau_1}=F_0(M),M\in\overline{G};W_k(M,\tau_1)=0 \qquad (16)$$

$$\left[\alpha^{(0)}\frac{\partial W_0}{\partial S}+\beta^{(0)}W_0(M)\right]/_{M\in\Gamma}=\phi^{(0)}(M,t);\left[\alpha^{(k)}\frac{\partial W_k}{\partial S}+\beta^{(k)}W_k(M)\right]/_{M\in\Gamma}=0; \qquad (17)$$

Здесь G – конечная область, ограниченная замкнутой кусочно-гладкой поверхностью Γ ; S – внешняя нормаль к Γ; $\alpha^{(k)}\geq 0,\beta^{(\kappa)}\geq 0;\ \alpha^{(0)}+\beta^{(0)}\geq 0.$

В целом данная задача относится к неоднородным краевым задачам теории консолидации упругоползучих грунтов с учетом их физической нелинейности. Решение этой задачи, безусловно, представляет большие трудности. Однако знание собственных значений $\{\nu_\kappa^2\}$ собственных функций $\{\psi_\kappa(M)\}$ соответствующей однородной задачи позволяет решать и неоднородные задачи.

Решение уравнения (15) находим при помощи метода возмущений, успешно применяемого в теории упругости неоднородных тел [5]. Согласно этому методу введем некоторый малый параметр ρ т.е.

$$\eta(x,y,z)=\rho\eta_0(x,y,z), \qquad (18)$$

Здесь $\eta_0(x,y,z)$ – некоторая непрерывная функция, отражающая неоднородность уплотняемого грунта.

Решение уравнения (15) представим в виде:

$$\mathrm{W}_\kappa(x,y,z,t)=\sum_{j=0}^{\infty}W_{\kappa j}(x,y,z,t)\rho^j, \qquad (19)$$

где $W_{\kappa j}(x,y,z)$ – некоторая непрерывная функция, подлежащая определению.

Для определения этой функции выражения (18) и (19) подставим в (15), затем приравнивая коэффициенты при ρ правой и левой части полученного равенства, находим следующую систему уравнений:

$$A_0\frac{\partial}{\partial t}W_{kj}(x,y,z,t)+a_1\gamma_1W_{kj}(x,y,z,t)-a_1\gamma_1^2\int_{\tau_1}^{t}W_{kj}(x,y,z,\tau)e^{-\gamma_1(t-\tau)}d\tau=$$

$$=C_V\nabla^2W_{kj}(x,y,z,t)+\Phi_{kj-1}^H,k,j=0,1,2,... \qquad (20)$$

где

$$\Phi_{\kappa j}^{H}=-\alpha_{H}\eta_{0}\left\{a_{0}\frac{\partial}{\partial t}W_{\kappa j-1}+\frac{\beta_{H}}{\alpha_{H}}a_{1}\gamma_{1}W_{\kappa j-1}-\frac{\beta_{H}}{\alpha_{H}}a_{1}\gamma_{1}^{2}\int_{\tau_{1}}^{t}W_{\kappa j-1}e^{-\gamma_{1}(t-\tau)}d\tau\right\}-a_{1}\gamma_{1}\left(1-\eta_{0}\beta_{H}\right)F_{\kappa-1}+$$

$$+(1-\eta_{0}\beta_{H})a_{1}\gamma_{1}^{2}\int_{\tau_{1}}^{t}F_{\kappa j-1}e^{-\gamma_{1}(t-\tau)}d\tau,\Phi_{0j-1}^{H}=F_{0}^{H}.$$

Решив систему линейных интегро-дифференциальных уравнений (20) при соответствующих начальных и граничных условиях находим неизвестные функции $W_{\kappa j}(x,y,z,t)$. Тогда согласно выражениям (13) и (19) сумма главных напряжений в скелете уплотняемого грунта представляется в виде:

$$\theta(x,y,z,t)=\sum_{\kappa=0}^{\infty}\sum_{j=0}^{\infty}W_{\kappa j}(x,y,z,t)\mu^{\kappa}\rho^{j}. \qquad (21)$$

Распределение давлений в поровой жидкости $p(x,y,z,t)$ находится из выражения (10), т.е.

$$p(x,y,z,t)=\frac{\theta^{*}(x,y,z)}{n}+$$
$$+p^{*}(x,y,z)-\frac{\theta(x,y,z)}{n}. \qquad (22)$$

Здесь $\frac{1}{n}\theta^{*}(x,y,z)+p^{*}(x,y,z)$ – давление в поровой жидкости, соответствующее начальному моменту времени.

Осадку верхней поверхности уплотняемого массива находим из следующего выражения

$$S(x.y.t)=\frac{1}{1+\varepsilon_{cp}}\int_{0}^{h}\left[\varepsilon_{0}-\varepsilon(x.y.z.t)\right]dz, \qquad (23)$$

где $\varepsilon_{0}-\varepsilon(x.y.z.t)$ имеет вид (5).

Таким образом, сумма главных напряжений в скелете грунта, давление в поровой жидкости и вертикальные перемещения верхней поверхности уплотняемого массива находятся соответственно из формул (21)-(23).

Ниже в качестве примера рассмотрим решение одномерной задачи консолидации неоднородных упругоползучих грунтов, где требуется определить напряжение в скелете грунта $\sigma(z, t)$, давление в поровой жидкости $p(z, t)$ и величину осадки $S(t)$ уплотняемого массива неоднородного упругоползучего грунта конечной мощности. Расчетной схемой является слой грунта мощностью h в момент времени $t=\tau_1$, он подвержен действию распределенной нагрузки с интенсивностью $q(z, t)$. Верхняя поверхность уплотняемого массива водопроницаема, а нижняя водонепроницаема.

Определение напряжений в скелете грунта $\sigma(z, t)$ при $n = 1$ сводится к решению системы линейных интегро-дифференциальных уравнений, полученных из (18). Эти уравнения можно привести к дифференциальным уравнениям второго порядка. Для этого обе части (20) при $n = 1$ продифференцируем по времени, затем полученное выражение сложим с (20) предварительно умножив (20) на γ_1. При этом получим:

$$\frac{\partial^{2}W_{\kappa j}(z,t)}{\partial t^{2}}+M\frac{\partial W_{\kappa j}(z,t)}{\partial t}=C_{1v}\left(\gamma_{1}+\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial^{2}W_{\kappa j}}{\partial z^{2}}+$$
$$+C_{1V}\left(\gamma_{1}+\frac{\partial}{\partial t}\right)\cdot F_{\kappa j}(z\ t), \qquad (24)$$

где

$$M=\frac{a_{1}\gamma_{1}}{a_{0}+\beta^{/}\left(1+\varepsilon_{cp}\right)};$$

$$C_{1V}=\frac{\kappa\left(1+\varepsilon_{cp}\right)}{\gamma_{B}[a_{0}+\beta^{/}\left(1+\varepsilon_{cp}\right)]}.$$

Уравнения (24) являются дифференциальными уравнениями второго порядка с постоянными коэффициентами M и C_{1V}, которые зависят от свойств уплотняемого грунтового массива. Для решения их необходимо знать два начальных и граничных условий. Одно начальное условие имеет вид:

$$W_{kj}=f_{kj},\ f_{00}=q\ ,\ f_{kj}=0\ , \qquad (25)$$

т.е. при $t=\tau_1$ вся нагрузка передается на жидкость. Второе начальное условие находится из (20) при $t = \tau_1$. Проделав это получим:

$$A_{0}\frac{\partial W_{\kappa j}(z,t)}{\partial t}\Big|_{t=\tau_{1}}+a_{1}\gamma_{1}W_{kj}(z,\tau_{1})=$$
$$=C_{1v}\frac{\partial^{2}W_{\kappa j}}{\partial z^{2}}\Big|_{t=\tau_{1}}+F_{kj-1}(z,\tau_{1}). \qquad (26)$$

Граничными условиями рассматриваемой задачи будут:

$$W_{kj}(h,t)=q,$$
$$\frac{\partial W_{kj}(z,t)}{\partial z}\Big|_{z=0}=0. \qquad (27)$$

Решение (24), удовлетворяющее краевым условиям (25)-(27) получим в виде:

$$W_{kj}\left(z,t\right)=\sum_{i=1}^{\infty}T_{kji}\sin\frac{\left(2i+1\right)\pi}{2h}z, \tag{28}$$

где

$$T_{kji}\left(t\right)=\sum_{\alpha=1}^{2}C_{\alpha kji}\cdot e^{-r_{\alpha kji}t}+\frac{1}{r_{2kji}-r_{1kji}}\int_{\tau_1}^{t}R_{kji}\left(\tau\right)\cdot\sum_{\alpha=1}^{2}\left(-1\right)^{3-n}\cdot e^{-r_{\alpha kji}t}d\tau,$$

$$C_{\alpha kji}=\frac{e^{r_{\alpha kji}t}}{r_{2kji}-r_{1kji}}\cdot\left[G_{kji}-q_{kji}\left(a_1\gamma_1-\lambda_i^2-r_{3=\alpha kji}\right)\right],\alpha=1,2,$$

$$R_{kji}\left(t\right)=\frac{2}{h}\int_{0}^{h}C_{1V}\left(\gamma_1+\frac{\partial}{\partial t}\right)\cdot F_{kj}\sin\frac{\left(2i+1\right)\pi}{2h}zdz.$$

Здесь

$$G_{kji}\left(t\right)=\frac{2}{A_0 h}\int_{0}^{h}F_{kj-1}\cdot\sin\frac{\left(2i+1\right)\pi}{2h}zdz\ ;\ g_{kji}\left(t\right)=\frac{2}{h}\int_{0}^{h}f_{kj}\cdot\sin\frac{\left(2i+1\right)\pi}{2h}zdz.$$

Величины r_{1kji}, r_{2kji} являются корнями уравнения:

$$r^2+\left(M+\lambda_i^2C_{1V}\right)r+C_{1V}\lambda_i^2=R_{kji}\left(t\right),$$

где

$$\lambda_i=\frac{2i+1}{2h}\pi\ .$$

Выражение (28) подставив в (21) получим напряжение в скелете уплотняемого грунта, расчетная схема которого дана выше. Следовательно, расчетная формула для вычисления напряжений в скелете грунта имеет вид:

$$\sigma\left(z,t\right)=q-\sum_{k=0}^{\infty}\sum_{j=0}^{\infty}\sum_{i=0}^{\infty}T_{kji}\left(t\right)\mu^k\rho^j\sin\frac{\left(2i+1\right)\pi}{2h}z\ . \tag{29}$$

Расчетная формула (29) дает возможность учитывать влияния неоднородности среды и физической нелинейности ее формирования на напряженно-деформированное состояние уплотняемого массива. Причем численная реализация расчетной формулы (29) показала, что напряжение в скелете грунта в каждой точке уплотняемого слоя грунта, получается, по величине меньше на 10, 15 процентов, чем для однородного грунтового массива. Распределение порового давления и вертикальные перемещения точек верхней поверхности уплотняемого грунтового массива находятся из выражений (22),(23).

Следует заметить, что подобные задачи в другой постановке исследованы в [2–3].

Список литературы

1. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. – М.: Гостехтеориздат. 1952. – 323 с.

2. Дасибеков А., Юнусов А.А., Юнусова А.А., Абжапбаров А.А. Физичекая нелинейность в консолидации грунтов. – М., 2014. – № 8, часть 1. – С. 47–52.

3. Дасибеков А., Юнусов А.А., Айменов Ж.Т., Юнусова А.А., Саржанова М.Ж. Неоднородность грунтов в основании фундаментов как основная причина повреждений зданий, Ж. Современные наукоемкие технологии. – М., 2015. – № 3. – С. 23–27.

4. Месчян С.Р. Ползучесть глинистых грунтов. – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР,1967. – 316 с.

5. Ломакин В.А. Теория упругости неоднородных тел. – М.: Изд. МГУ, 1976. – С. 7–205.

6. Флорин В.А. Основы механики грунтов. – М.: Госстройиздат, 1961. – 543 с.