

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ АНИЗОТРОПИИ НА НАЧАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ОСНОВАНИЙ

При решении задач об устойчивости и консолидации водонасыщенных оснований начальным условием является допущение, введенное в 1925 г. в теорию механики грунтов К. Терцаги [1], о передаче внешней нагрузки в момент приложения полностью на поровую воду. При этом в процессе уплотнения водонасыщенного грунта в результате отжатия воды величина порового давления уменьшается, а эффективные напряжения возрастают до стабилизированных. Данная модель фильтрационной консолидации о перераспределении внешней нагрузки во времени между поровой водой и скелетом основания является общепринятой. Однако допущение о передаче нагрузки в начальный момент времени полностью на воду вызывало разногласия среди исследователей [2...5].

Рассмотрим начальное напряженное состояние водонасыщенного основания для условий плоской деформации при восприятии внешней нагрузки как поровой водой, так и скелетом загружаемого основания. При решении поставленной задачи используем следующие допущения: основание линейно деформируемо при загрузении; скелет грунта принимается невесомым; напорная функция, а следовательно, и система фильтрационных давлений, действующих на скелет грунта во всех точках полуплоскости, удовлетворяют уравнению Лапласа.

Используем известные уравнения равновесия, обобщенного закона Гука при плоской деформации изотропной среды, неразрывности деформаций скелета и напорной фильтрационной функции [6]. На загружаемой поверхности экспериментально определим долю восприятия нагрузки поровой водой β и скелетом основания $\alpha = 1 - \beta$.

Математическими преобразованиями сводим задачу к решению дифференциального уравнения неразрывности деформаций, выраженного через функцию Эри $\varphi(x, y)$ [7].

Для случая плоской деформации однородного изотропного основания решим уравнение неразрывности

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = \gamma \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu} \nabla^2 H. \quad (1)$$

При $\nabla^2 H = 0$, где $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)$ – оператор Лапласа, формула (1) принимает вид

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = 0.$$

Совместно с граничными условиями

$$\sigma_y(x, 0) = \alpha P(x); \tau_{xy}(x, 0) = 0, H = \begin{cases} \frac{\beta P(x)}{\gamma} & \text{при } -b \leq x \leq b \\ 0 & \text{при } |x| > b \end{cases} \quad (1^*)$$

$$\sigma_y(x, \infty) = \sigma_x(x, \infty) = \tau_{xy}(x, \infty) = H(x, \infty) = 0,$$

В ходе решения были получены формулы для начальных напряжений в изотропном водонасыщенном основании при действии внешней равномерно распределенной нагрузки $P(x) = P_0$ на участке от $-b$ до b :

$$\sigma_y = \frac{\alpha P_0}{\pi} \left[\left(\operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 b^2 + x^2} + \nu \pi \right) + y \left(\frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) \right] + \frac{\beta P_0}{\pi} y \left(\frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right);$$

$$\sigma_x = \frac{\alpha P_0}{\pi} \left[\left(\operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 - b^2 + x^2} + \nu \pi \right) - y \left(\frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) \right] - \frac{\beta P_0}{\pi} y \left(\frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right); \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{P_0 y}{\pi} \left(\frac{y}{y^2 + (b-x)^2} - \frac{y}{y^2 + (b+x)^2} \right);$$

$$H = \frac{\beta P_0}{\pi \gamma} \left(\operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 + x^2 - b^2} + \nu \pi \right),$$

где при $y = 0$: $\nu = 1$ при $-b \leq x \leq b$, $\nu = 0$ при $|x| > b$; $y > 0$: $\nu = 1$ при $y^2 - b^2 + x^2 < 0$, $\nu = 0$ при $y^2 - b^2 + x^2 \geq 0$. (3)

Эти выражения учитывают передачу нагрузки невесомой среде от граничного нагружения скелета грунта и фильтрационных сил от пришедшей в движение воды. При $\beta = 0$ и $\alpha = 1$ формулы (2) принимают вид выражений Г.В. Колосова: стабилизированные напряжения для условий плоской задачи линейно деформируемой среды соответственно при завершении процесса консолидации,

Для полученных формул была составлена программа (ЭВМ), позволяющая представить картины распределения напряжений на АППУ. Из распределения эквипотенциалей порового давления и напряжений (рис. 1) видно характерное различие горизонтальных и вертикальных нормальных напряжений, отличное от ранее полученного решения Н.М. Герсеванова [8], основанного на допущении К. Терцаги. По решению Н.М. Герсеванова, горизонтальные и вертикальные нормальные напряжения равны между собой и противоположны по знаку.

Существенным фактором, влияющим на начальное напряженное состоя-

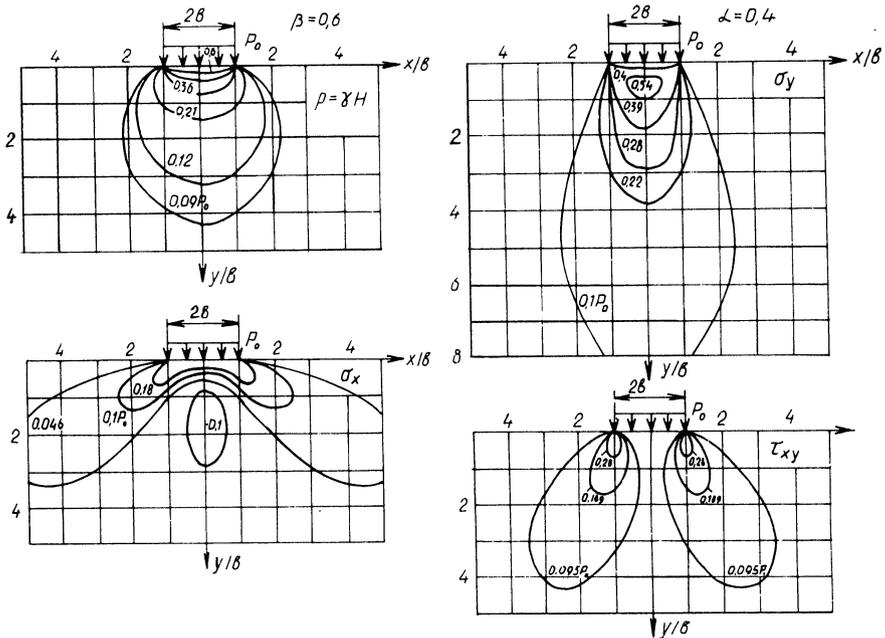


Рис. 1. Распределение порового давления и напряжений в водонасыщенном изотропном основании.

ние, а следовательно, на допустимую нагрузку строящегося сооружения и возможные его осадки, является анизотропия фильтрационных свойств водонасыщенного основания. Причем для строительно-технологических целей выбора допустимой начальной нагрузки при возведении сооружений из местных материалов на водонасыщенных основаниях начальное напряженное состояние в его строгой математической постановке в момент времени $t = 0$ не отражает действительной работы основания при загрузении. В то время как начальное напряженное состояние загружаемого водонасыщенного основания в некоторый момент времени $t \rightarrow 0$ (соответствующий мгновенной осадке), учитывающий тенденцию развития гидродинамического фильтрационного потока из-под возводимого сооружения, более точно соответствует периоду начального загрузки основания. С учетом вышесказанного будем рассматривать анизотропию проницаемости грунтов, характеризуемую отношением

$$n^2 = \frac{K_x}{K_y},$$

где K_x , K_y – коэффициенты фильтрации грунта, слагающего основание соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях.

В этом случае уравнение напорной фильтрационной функции для плоской задачи примет вид [9, 10]

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \text{ или } n^2 \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0. \quad (4)$$

При данной постановке задачи необходимо решать уравнение неразрывности скелета грунта (1) совместно с уравнением напорной функции (4) при граничных условиях (1*), Для случая равномерно распределенной нагрузки $P(x) = P_0$, действующей на участке от $-b$ до b , были получены формулы для определения напряжений и порового давления $p = \gamma H$:

$$\begin{aligned} \sigma_y = & \frac{aP_0}{\pi} \left(\left(\operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) + y \left(\frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) \right) + \frac{\beta P_0}{\pi} \left\{ (\gamma+1) \left(\operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) - \right. \\ & - (\gamma n - \gamma - 1) y \left(\frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) - \\ & \left. - (\gamma+1) \left(\operatorname{arctg} \frac{2nby}{n^2 y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) \right\}; \\ \sigma_x = & \frac{aP_0}{\pi} \left(\left(\operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) - y \left(\frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) \right) + \frac{\beta P_0}{\pi} \left\{ (\gamma n^2 - 1) \left(\operatorname{arctg} \frac{2nby}{n^2 y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) - \right. \\ & - (2\gamma n - \gamma - 1) \left(\operatorname{arctg} \frac{2by}{y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right) + (\gamma n + \gamma - 1) y \times \\ & \left. \times \left(\frac{b+x}{y^2 + (b+x)^2} + \frac{b-x}{y^2 + (b-x)^2} \right) \right\}; \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = & \frac{aP_0}{\pi} y \left(\frac{y}{y^2 + (b-x)^2} - \frac{y}{y^2 + (b+x)^2} \right) + \\ & + (\gamma n - \gamma - 1) y \left(\frac{y}{y^2 + (b-x)^2} - \frac{y}{y^2 + (b+x)^2} \right) \Big\}, \end{aligned}$$

$$H = \frac{\beta P_0}{\pi \gamma} \left(\operatorname{arctg} \frac{2nby}{n^2 y^2 - b^2 + x^2} + \nu\pi \right),$$

где $\gamma = \frac{1 - 2\mu}{(1 - \mu)(n^2 - 1)}$, для определения ν см. (3).

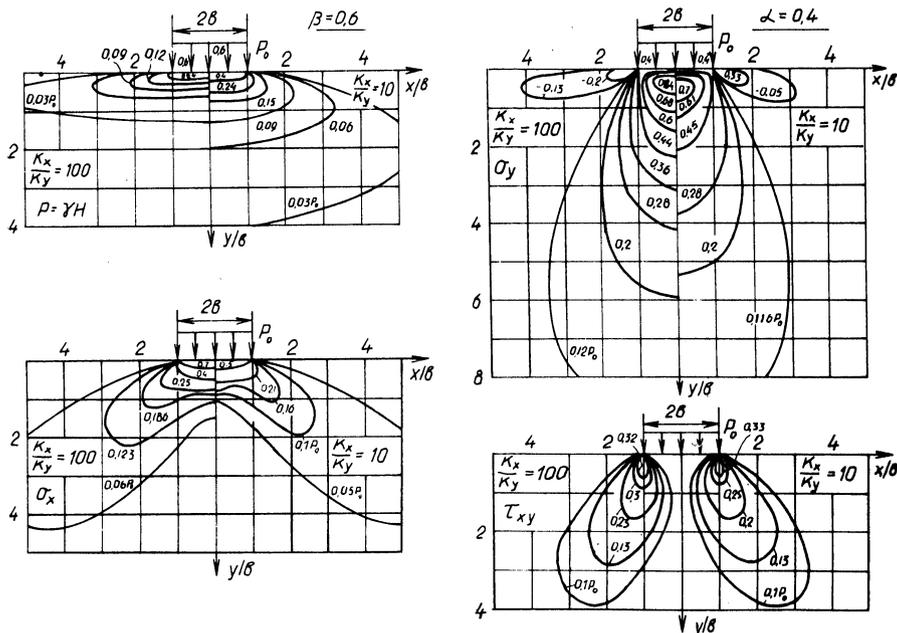


Рис. 2. Распределение порового давления и напряжений в основании с преобладающей горизонтальной водопроницаемостью.

Данные формулы удовлетворяют поставленным граничным условиям (1*). Для изотропного случая при $n^2 = 1$ формулы (5) принимают вид (2).

По формулам (5), описывающим распределение напряжений и порового давления в анизотропном по водопроницаемости водонасыщенном основании от действия единичной равномерно распределенной полосовой нагрузки при помощи разработанной программы для ЭВМ построены картины распределения напряжений и порового давления для различных случаев фильтрационной анизотропии (рис. 2, 3).

Из рис. 2 видно, что с увеличением водопроницаемости в горизонтальном направлении происходит бóльшая в сравнении с изотропным случаем концентрация порового давления под нагрузкой и в стороны от нее. При этом вертикальные напряжения в скелете грунта σ_y под площадкой загрузки больше по численным значениям по сравнению с изотропным основанием на 20–30 % в зависимости от величины представленных значений показателя фильтрационной анизотропии n^2 . По краям нагрузки появляются зоны с отрицательным значением напряжений σ_y до 20 % от действующей нагрузки. Это объясняет встречающиеся в строительной практике выпоры, образующиеся по краям загружаемой площади водонасыщенного основания с преобладающей горизонтальной проницаемостью грунтов, таких как ленточные глины, торфы, сапропели, имеющие показатель фильтрационной анизотропии $n^2 = 10 \dots 100$ (в зависимости от вида и уплотненности грунта).

Распределение порового давления в глубь массива под возводимое соору-

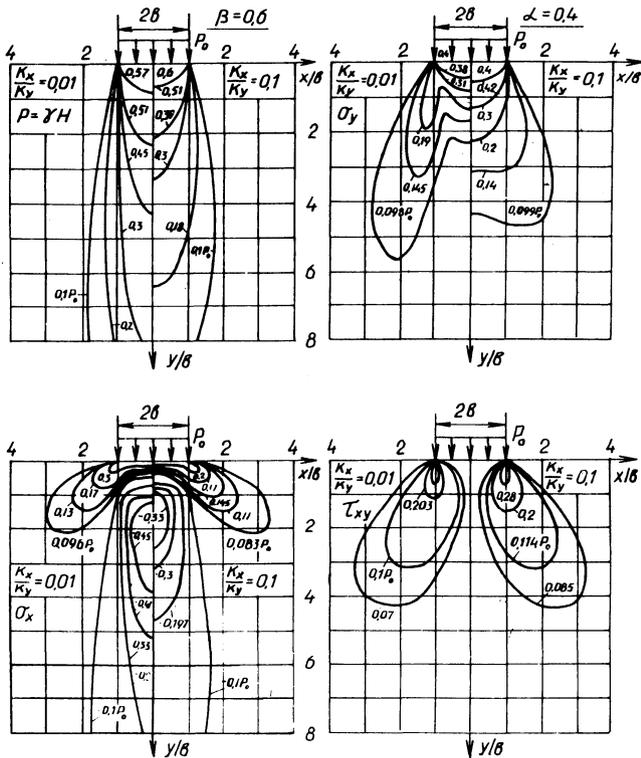


Рис. 3. Распределение порового давления и напряжений в основании с преобладающей вертикальной водопроницаемостью.

жение при преобладании водопроницаемости основания в вертикальном направлении (см. рис. 3) приводит к уменьшению вертикальных напряжений σ_y в скелете основания и вызывает возникновение значительных (до 45 % от P_0 при $n^2 = 1/100$) растягивающих горизонтальных напряжений σ_x на большую глубину основания (до 4 полуширин нагружения b). Этим объясняются большие мгновенные осадки сооружений, возводимых на основаниях с преобладающей вертикальной проницаемостью грунтов (например, лессы $n^2 = 1/10 \dots 1/50 \dots 1/100$).

Таким образом, начальное напряженное состояние оснований необходимо рассматривать с учетом восприятия внешней нагрузки как поровой водой, так и скелетом основания с учетом фильтрационной анизотропии основания для более достоверной оценки несущей способности, конечных осадков и протекания их во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герцаги К. Теория механики грунтов. — М., 1961. — 507 с.
2. Флорин В.А. Основы механики грунтов. — М.; Л., 1961. Т. 2. — 160 с.
3. Денисов Н.Я. О природе деформаций глинистых пород. — М. — 1951, — 199 с.
4. Веригин Н.Н. Об уплот-

нении грунтов под нагрузкой // Прикладная механика и теоретическая физика. — 1961. — № 1. — 31 с. 5. Цытович Н.А. и др. Экспериментальные исследования порового давления в водонасыщенных грунтах // Строительство на слабых грунтах. — Рига, — 1970. — 74 с. 6. Соболевский С.В., Павловец В.В. К вопросу о начальном напряженном состоянии анизотропного водонасыщенного основания // Водное хоз-во и гидротехнич. стр-во. — 1988. — Вып. 17. — 213 с. 7. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. — М.; Л. — 1950. — 299 с. 8. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовой массы. — М. — 1937. — 241 с. 9. Соболевский Ю.А. Водонасыщенные откосы и основания. — Мн. — 1975. — 398 с. 10. Полубаринов-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. — М. — 1977. — 664 с.

УДК 624.131.52

Н.Д. БАННИКОВ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗБЫТОЧНЫХ НАПОРОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ВО ВРЕМЕНИ В ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ ОСНОВАНИЯХ ПРИ ИХ ЗАГРУЖЕНИИ

При строительстве гидротехнических сооружений часто в качестве оснований используют водонасыщенные грунты, которые имеют различные деформативные характеристики в горизонтальном E_x и вертикальном E_z направлениях. Такие грунты принято называть трансверсально-изотропными. К ним относятся ленточные глины, лессовые и торфяные отложения. По данным исследователей, отношение модулей деформации их ($n = E_x/E_z$) колеблется в пределах 1–1,5...2.

Наличие механической анизотропии вносит коррективы в напряженно-деформируемое состояние таких оснований, и протекающие процессы должны отличаться от изотропных. Идет поиск расчетных зависимостей, учитывающих эти особенности грунтов.

Одной из важнейших задач является умение прогнозировать избыточные напоры, которые возникают в таких основаниях при их мгновенном нагружении. При изучении этого вопроса нами рассмотрены следующие уравнения:

$$\epsilon_x = \beta_{11} \sigma_x + \beta_{12} \sigma_z; \quad (1)$$

$$\epsilon_z = \beta_{12} \sigma_x + \beta_{22} \sigma_z; \quad (2)$$

$$\sigma_x = \sigma_x^* - \gamma_w H; \quad \sigma_z = \sigma_z^* - \gamma_w H; \quad (3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = (1 + e_0) \left(k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right); \quad (4)$$

$$\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_z = (e_0 - e)/(1 + e_0), \quad (5)$$

где ϵ_x, ϵ_z — относительные деформации в направлении осей x и z ; $\beta_{11} = (1 - \nu_1^2)/E_x$; $\beta_{22} = (1 - \nu_2^2 \frac{E_x}{E_z})/E_z$; $\beta_{12} = -\nu_2(1 + \nu_1)/E_z$; σ_x^*, σ_z^* — нор-