

Ю. А. Соболевский, В. А. Рыжков

**УСТОЙЧИВОСТЬ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ БЫСТРОЗАГРУЖАЕМЫХ ОСНОВАНИЙ**

При аналитическом исследовании начального напряженного состояния анизотропных по водопроницаемости оснований нами была обнаружена существенная разница в распределении напряжений по сравнению с изотропными грунтами [1, 2, 3]. Анализ проводился на основе решения задачи теории фильтрации и упругости в отношении начального напряженного состояния.

В данной работе начальные условия фильтрации и граничные напряжения по ширине полосы загрузки  $2b$  используются для решения задачи о начальной устойчивости быстрозагружаемых водонасыщенных оснований методами статики сыпучей среды.

Задача сводится в определению двусторонней нагрузки  $q(y)$ , которая будет препятствовать выпору основания, при заданных значениях угла внутреннего трения  $\varphi$ , удельной силы сцепления  $c$  и соотношения коэффициентов фильтрации в горизонтальном и вертикальном направ-

лениях  $\frac{k_y}{k_x}$ .

Если рассматривать грунт как сыпучую среду, сопротивляющуюся сдвигу силами трения, то можно предположить, что в предельном состоянии максимальная разность между абсолютной величиной касательного напряжения и сопротивления сдвигу равна нулю

$$\max \{ |\tau_n| - (\sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c) \} = 0. \quad (1)$$

Площадки, на которых удовлетворяется соотношение (1), являются площадками скольжения. В любой точке предельно напряженной области грунта их всегда две, и они пересекаются под углами

$$\frac{\pi}{2} - \varphi, \quad \frac{\pi}{2} + \varphi.$$

Обозначая угол наклона большего главного напряжения к вертикальной оси  $x$  через  $\delta$ , а углы наклона площадок скольжения первого и второго семейств к оси  $x$  — соответственно через  $\beta_1, \beta_2$ , получим

$$\beta_1 = \delta + \mu, \quad \beta_2 = \delta - \mu,$$

$$\text{где } \mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}. \quad (2)$$

Плоская задача статики сыпучей среды сводится к решению системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial \delta_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = X, \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = Y, \\ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = (\sigma_x + \sigma_y + 2\sigma_c)^2 \sin^2 \varphi, \end{cases} \quad (3)$$

решение которой при статических граничных условиях дает возможность определить напряжения в любой точке среды и установить очертаения линий скольжения.

Уравнение предельного равновесия может быть выражено через главные напряжения следующим образом:

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = (\sigma_1 + \sigma_2 + 2\sigma_c) \sin \varphi. \quad (4)$$

Напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ , входящие в уравнения (3), можно выразить через главные напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и углы  $\delta$  и  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\delta, \\ \sigma_y &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\delta, \\ \tau_{xy} &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\delta. \end{aligned} \quad (5)$$

Если обозначить

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \sigma_c,$$

то

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) = \sigma - \sigma_c. \quad (6)$$

Из (4) и (6) путем сопоставления можно получить зависимость

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) = \sigma \sin \varphi. \quad (7)$$

Используя зависимости (6) и (7), выражения (5) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma (1 + \sin \varphi \cos 2\delta) - \sigma_c, \\ \sigma_y &= \sigma (1 - \sin \varphi \cos 2\delta) - \sigma_c, \\ \tau_{xy} &= \sigma \sin \varphi \sin 2\delta. \end{aligned} \quad (8)$$

На основании зависимостей (2) выражения (8) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma [1 + \sin \varphi \sin (2\beta_1 + \varphi)] - \sigma_c, \\ \sigma_y &= \sigma [1 - \sin \varphi \sin (2\beta_1 + \varphi)] - \sigma_c, \\ \tau_{xy} &= -\sigma \sin \varphi \cos (2\beta_1 + \varphi).\end{aligned}\quad (9)$$

Дифференцируя зависимости (9) по  $dx$  и  $dy$ , подставляя производные в уравнения равновесия (3) и учитывая, что

$$\cos \beta_1 = \frac{dx}{ds_1}, \quad \cos \beta_2 = \sin (\beta_1 + \varphi) \cdot \frac{dx}{ds_2}, \quad (10)$$

получаем систему двух дифференциальных уравнений равновесия, удовлетворяющих условию предельного состояния:

$$\left. \begin{aligned}\frac{\partial \sigma}{\partial s_1} + 2\sigma \operatorname{tg} \varphi \frac{\partial \beta_1}{\partial s_1} &= -\frac{A}{\cos \varphi \cos \beta_1} \cdot \frac{dx}{ds_1}, \\ \frac{\partial \sigma}{\partial s_2} - 2\sigma \operatorname{tg} \varphi \frac{\partial \beta_1}{\partial s_2} &= -\frac{B}{\cos \varphi \sin (\beta_1 + \varphi)} \cdot \frac{dx}{ds_2},\end{aligned}\right\} \quad (11)$$

где  $A = -X \cos (\beta_1 + \varphi) - Y \sin (\beta_1 + \varphi)$ ;  $B = -X \sin \beta_1 + Y \cos \beta_1$ . Здесь

$X = -\gamma_{взв} + \gamma_0 \frac{\partial H}{\partial x}$  и  $Y = \gamma_0 \frac{\partial H}{\partial y}$  представляют собой объемные силы.

Для решения задачи необходимо добавить для первого и второго семейств линий скольжения выражения

$$\begin{aligned}\frac{\partial y}{\partial s_1} \cos \beta_1 - \frac{\partial x}{\partial s_1} \sin \beta_1 &= 0, \\ \frac{\partial y}{\partial s_1} \sin (\beta_1 + \varphi) + \frac{\partial x}{\partial s_2} \cos (\beta_1 + \varphi) &= 0.\end{aligned}\quad (12)$$

В. В. Соколовским [4] был разработан общий метод решения уравнений (11) и (12), который мы используем при решении вопросов начальной устойчивости быстроагружаемых анизотропных по водопроницаемости оснований.

*Предельное состояние анизотропного основания при преобладании горизонтальной водопроницаемости над вертикальной.* Полагаем, что грунт имеет преобладающую горизонтальную водопроницаемость над вертикальной. Как следует из решения задачи о распределении начальных напряжений, при передаче всей нагрузки на воду в пограничном с полосовой нагрузкой слое возникают касательные напряжения, нормальные же напряжения равны нулю.

Тогда

$$\begin{aligned}\sigma_x = \sigma_y = \sigma_n &= 0, \\ \tau_{xy} = \tau_n &\neq 0.\end{aligned}$$

Из выражений (5) и (7) вытекает, что в этом слое

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma \sin \varphi \cos 2\delta, \\ \sigma_y &= -\sigma \sin \varphi \cos 2\delta, \\ \tau_{xy} &= \sigma \sin \varphi \sin 2\delta,\end{aligned}\quad (13)$$

тогда как  $\sigma_1 = -\sigma_2$ .

При  $\sigma_x = 0$ ,  $\sin \varphi \neq 0$  и  $\delta \neq 0$  и только  $\cos 2\delta = 0$ , откуда

$$\delta = -\frac{\pi}{4}, \quad \tau_{xy} = -\sigma \sin \varphi. \quad (14)$$

Полагаем также, что на участке граничной поверхности  $OD$  при  $x=0$  и  $y>0$  напряжения  $\tau_{xy}=0$ , а напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  неизвестны и подлежат определению из условия, что основание находится в предельном состоянии. В этом случае в области максимального напряженного состояния наибольшее главное напряжение направлено параллельно оси  $y$ , вследствие чего  $\delta = -\frac{\pi}{2}$ . Отсюда из (13) при  $\sigma_n = q(y)$  получаем

$$q(y) = \sigma \sin \varphi, \quad (15)$$

где  $q(y)$  — неизвестный закон распределения пригрузки на участке  $OD$ .

Выражения для объемных сил (фильтрационных и сил тяжести взвешенного в воде грунта) имеют вид

$$X = -\gamma_{взв} + \gamma_0 \frac{\partial H}{\partial x}; \quad (16)$$

$$Y = \gamma_0 \frac{\partial H}{\partial y}, \quad (17)$$

где  $H$  — напорная функция;  $\gamma_{взв}$  — объемный вес взвешенного в воде грунта;  $\gamma_0$  — объемный вес воды.

Значения  $\frac{\partial H}{\partial x}$  и  $\frac{\partial H}{\partial y}$  для каждой точки основания могут быть найдены из полученных ранее выражений [3]:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\rho_0}{\gamma_0 \pi} \left[ \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_x} (y+2b)}}{(y+2b)^2 + \frac{k_y}{k_x} x^2} - \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_x} y}}{y^2 + \frac{k_y}{k_x} x^2} \right] \quad (18)$$

и

$$\frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\rho_0}{\gamma_0 \pi} \left[ -\frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_x} x}}{(y+2b)^2 + \frac{k_y}{k_x} x^2} + \frac{\sqrt{\frac{k_y}{k_x} x}}{y^2 + \frac{k_y}{k_x} x^2} \right]. \quad (19)$$

Прежде чем приступить к численному решению задачи, необходимо найти величину скачка внешней нагрузки в особой точке  $O$ .

В соответствии с выражением (14) при  $\delta = -\frac{\pi}{4}$

$$\sigma = -\frac{\tau_{xy}}{\sin \varphi}, \tag{20}$$

а из выражения (2)

$$\beta'_1 = -\frac{\varphi}{2}. \tag{21}$$

В особой точке  $O$  при  $y=0$  и  $x=0$  находим величину скачка внешней нагрузки по формуле

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \exp [2(\beta'_1 - \beta'_i) \operatorname{tg} \varphi]. \tag{22}$$

Вдоль положительной полуоси при  $x=0$  из (2)

$$\beta''_1 = -\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right). \tag{23}$$

В точке  $O$  величины  $\beta'_1$  и  $\beta''_2$  означают углы наклона к касательным крайних кривых пучка линий скольжения первого семейства и очерчивают так называемую переходную область предельного напряженного состояния.

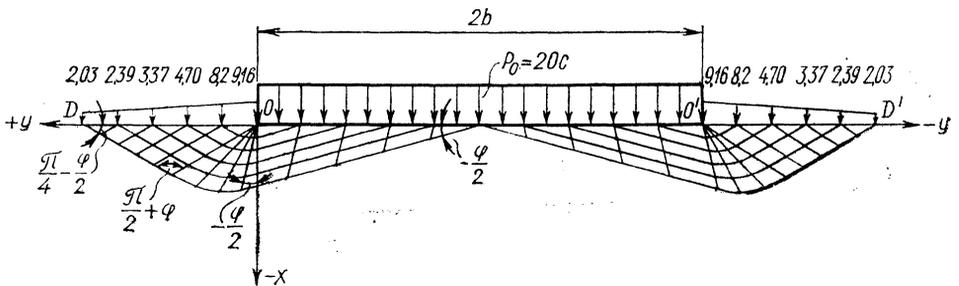


Рис. 1. Стека линий скольжения для водонасыщенного анизотропного основания с преобладающей горизонтальной водопроницаемостью

$$\left(\frac{k_y}{k_x} = 100; \varphi = 25^\circ; \gamma_{взв} = 0\right).$$

Для всех узлов пересечения (рис. 1) линий скольжения двух семейств вычисления для функций  $x$ ,  $y$ ,  $\sigma$ ,  $\beta$  производятся по формулам

$$\left. \begin{aligned} x_3 &= \frac{y_2 - y_1 + x \operatorname{tg} \beta_{11} + x_2 \operatorname{ctg}(\beta_{12} + \varphi)}{\operatorname{tg} \beta_{11} + \operatorname{ctg}(\beta_{12} + \varphi)}, \\ y_3 &= y_1 - (x_3 - x_2) \operatorname{ctg}(\beta_{12} + \varphi); \\ \beta_{13} &= \frac{1}{\sigma_2 + \sigma_1} \left[ \sigma_2 \beta_{12} + \sigma_1 \beta_{11} + \frac{1}{2} \operatorname{ctg}(\sigma_1 - \sigma_2) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{B_2(x_3 - x_2)}{2 \sin \varphi \sin(\beta_{12} + \varphi)} - \frac{A_1(x_3 - x_1)}{2 \sin \varphi \cos \beta_{11}} \right], \\ \sigma_3 &= \sigma_2 + 2 \operatorname{tg} \varphi \left[ \sigma_2(\beta_{13} - \beta_{12}) - \frac{B_2(x_3 - x_2)}{2 \sin \varphi \sin(\beta_{12} + \varphi)} \right], \end{aligned} \right\} \tag{24}$$

где:

$$A = -X_1 \cos(\beta_{12} + \varphi) - Y_1 \sin(\beta_{11} + \varphi),$$

$$B = -X_2 \sin \beta_{12} + Y \cos \beta_{12}.$$

Значения же функций  $y$ ,  $\beta$  и  $\sigma$  при  $x=0$  на положительной оси (рис. 1) определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} y_3 &= x_2 \operatorname{ctg}(\beta_{12} + \varphi) + y_2, \quad x_3 = 0, \\ \sigma_3 &= \sigma_2 + 2 \operatorname{tg} \varphi \left[ \sigma_2 (\beta_{13} - \beta_{12}) - \frac{B_2 (x_3 - x_2)}{2 \sin \varphi \sin(\beta_{12} + \varphi)} \right], \\ \beta_{13} &= \operatorname{const}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

На рис. 1 показана одна из полученных сеток линий скольжения для  $\varphi=25^\circ$ ,  $\gamma_{\text{взв}}=0$  и  $p_0=20$  с.

В табл. 1 приводятся для этого примера результаты вычислений, где  $x$ ,  $y$  и  $\sigma$  выражены в безразмерных величинах, а  $\beta$  — в радианах.

Вычисления производились на электронно-вычислительной машине «Минск-22» при  $p_0=20$  с для следующих значений:  $\varphi=5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ ;  $\frac{k_y}{k_x}=100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10$ .

В табл. 2 даны значения пригрузки  $q(y)$ , необходимой для обеспечения устойчивости основания для приведенных  $\varphi$ ,  $\frac{k_y}{k_x}$  и  $\gamma_{\text{взв}}$  при

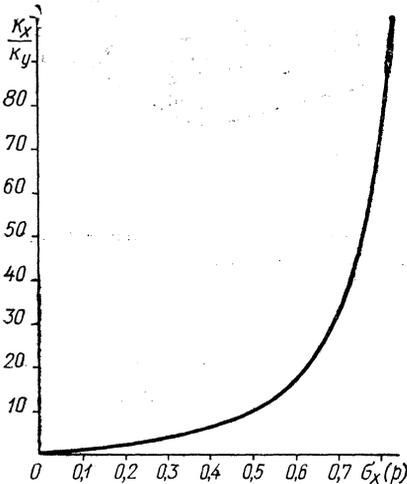


Рис. 2. Зависимость  $\sigma_x$  при  $y=0$  и  $-b < x < +b$  от отношения  $\frac{k_x}{k_y}$ .

быстром приложении нагрузки  $p_0 = 20$  с.

*Предельное состояние анизотропного основания при преобладании вертикальной водопроницаемости над горизонтальной.* Как следует из решения задачи о распределении начальных напряжений [3] в водонасыщенном анизотропном основании с преобладающей вертикальной водопроницаемостью, на скелет грунта действуют напряжения от быстро приложенной нагрузки и фильтрационные напряжения пришедшей в движение грунтовой воды.

Таким образом, на граничной поверхности в пределах загружаемого участка при  $x=0$ ,  $y>0$  созданы напряжения

$$\sigma_x = p_0 \frac{1 - \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}}{1 + \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}}, \quad \tau_{xy} = 0. \quad (26)$$

Направление главного напряжения  $\sigma_1$  параллельно оси  $x$ , вследствие чего угол  $\delta=0$ .

Таблица 1

Значения функций  $x$ ,  $y$ ,  $\beta_1$ ,  $\sigma$  в узлах сетки линий скольжения для основания с преобладающей горизонтальной водопроницаемостью

Определение функции	$i$   $j$														
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$x$	0						0,00	0,00	0,00	0,00					
$y$							0,00	0,00	0,00	0,00					
$\beta_1$							-0,2181	-0,4799	-0,7417	-1,0035					
$\sigma$							47,326	37,074	29,042	22,751					
$x$	1					0,00	-0,0466	-0,0501	-0,0492	-0,0424	0,000				
$y$						-0,20	0,0103	0,0260	0,0451	0,0667	0,1334				
$\beta_1$						-0,2181	-0,2181	-0,4799	-0,7417	-1,0035	-1,0035				
$\sigma$						27,082	45,279	34,103	25,777	19,559	19,388				
$x$	2				0,00	-0,0466	-0,0932	-0,1002	-0,0985	-0,0849	-0,0424	0,000			
$y$					-0,40	-0,1896	0,0206	0,0521	0,0903	0,1334	0,2001	0,2668			
$\beta_1$					-0,2181	-0,2181	-0,2181	-0,4799	-0,7417	-1,0035	-1,0035	-1,0035			
$\sigma$					17,085	27,321	28,947	21,872	16,764	13,120	13,876	11,130			
$x$	3		0	-0,0466	-0,0923	-0,1398	-0,1503	-0,1478	-0,1274	-0,0849	-0,0424	0,00			
$y$			-0,60	-0,0896	-0,1793	-0,0310	0,0782	0,1355	0,2001	0,2668	0,3335	0,4002			
$\beta_1$			-0,2181	-0,2181	-0,2181	-0,2181	-0,4799	-0,7417	-1,0035	-1,0035	-1,0035	-1,0035			
$\sigma$			10,751	18,549	22,262	23,140	17,563	13,642	10,973	11,835	11,795	7,972			
$x$	4		0,00	-0,0466	-0,0932	-0,1398	-0,1865	-0,2004	-0,1971	-0,1699	-0,1274	-0,0849	-0,0424	0,000	
$y$			-0,80	-0,5896	-0,3793	-0,1689	0,1043	-0,1806	0,2668	0,3335	0,4002	0,4669	0,5336	0,6003	
$\beta_1$			-0,2181	-0,2181	-0,2181	-0,2181	-0,2181	-0,4799	-0,7417	-1,0035	-1,0035	-1,0035	-1,0035	-1,0035	-1,0035
$\sigma$			4,1120	10,935	15,540	17,319	18,075	13,783	10,847	8,954	9,747	10,228	9,589	5,647	
$x$	5	0,00	-0,0466	-0,0932	-0,1398	-0,1865	-0,2331	-0,2506	-0,2464	-0,2124	-0,1699	-0,1274	-0,0849	-0,0424	0,000
$y$		-1,0	-0,7896	-0,5793	-0,3689	-0,1586	0,0516	0,1304	0,2258	0,3335	0,4002	0,4669	0,5336	0,6003	0,6670
$\beta_1$		-0,2181	-0,2181	-0,2181	-0,2181	-0,2181	-0,2181	-0,4799	-0,7417	-1,0035	-1,0035	-1,0035	-1,0035	-1,0035	-1,0035
$\sigma$		0	6,551	11,573	14,092	15,287	15,928	12,185	9,656	8,078	8,764	9,342	9,497	8,460	4,800

Таблица 2

Значения боковой пригрузки в безразмерных величинах от действия равномерно распределенной полосовой нагрузки интенсивностью  $p_0=20$  с

$\frac{k_y}{k_x}$ / $k^\circ$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
$\frac{100}{1}$	16,06	13,97	12,09	10,40	8,860	7,441	6,135	4,933
$\frac{1}{100}$	6,299	3,244	1,366	0,239	0	0	0	0
$\frac{90}{1}$	16,00	13,91	12,05	10,86	8,825	7,412	6,111	4,914
$\frac{1}{90}$	6,185	3,172	1,322	0,211	0	0	0	0
$\frac{80}{1}$	15,92	13,85	11,99	10,31	8,783	7,377	6,083	4,890
$\frac{1}{80}$	6,054	3,088	1,269	0,178	0	0	0	0
$\frac{70}{1}$	15,83	13,76	11,92	10,25	8,731	7,333	6,046	4,861
$\frac{1}{70}$	5,894	2,988	1,206	0,139	0	0	0	0
$\frac{60}{1}$	15,70	13,66	11,83	10,17	8,664	7,277	6,00	4,824
$\frac{1}{60}$	5,701	2,86	1,12	0,06	0	0	0	0
$\frac{50}{1}$	15,54	13,52	11,71	10,07	8,576	7,203	5,939	4,775
$\frac{1}{50}$	5,457	2,711	1,032	0,032	0	0	0	0
$\frac{40}{1}$	15,32	13,32	11,54	9,926	8,452	7,099	5,853	4,706
$\frac{1}{40}$	5,135	2,506	0,904	0	0	0	0	0
$\frac{30}{1}$	14,98	13,03	11,28	9,707	8,265	6,942	5,724	4,602
$\frac{1}{30}$	4,679	2,217	0,722	0	0	0	0	0
$\frac{20}{1}$	14,40	12,52	10,84	9,330	7,944	6,672	5,501	4,423
$\frac{1}{20}$	3,955	1,758	0,435	0	0	0	0	0
$\frac{10}{1}$	13,08	11,38	9,855	8,475	7,217	6,062	4,998	4,018
$\frac{1}{10}$	2,488	0,824	0	0	0	0	0	0

Граничные условия на участке  $OA$  на основании (8) принимаем в виде

$$\sigma = \frac{p_0 \left( \frac{1 - \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}}{1 + \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}} \right) + \sigma_c}{1 + \sin \varphi}, \quad (27)$$

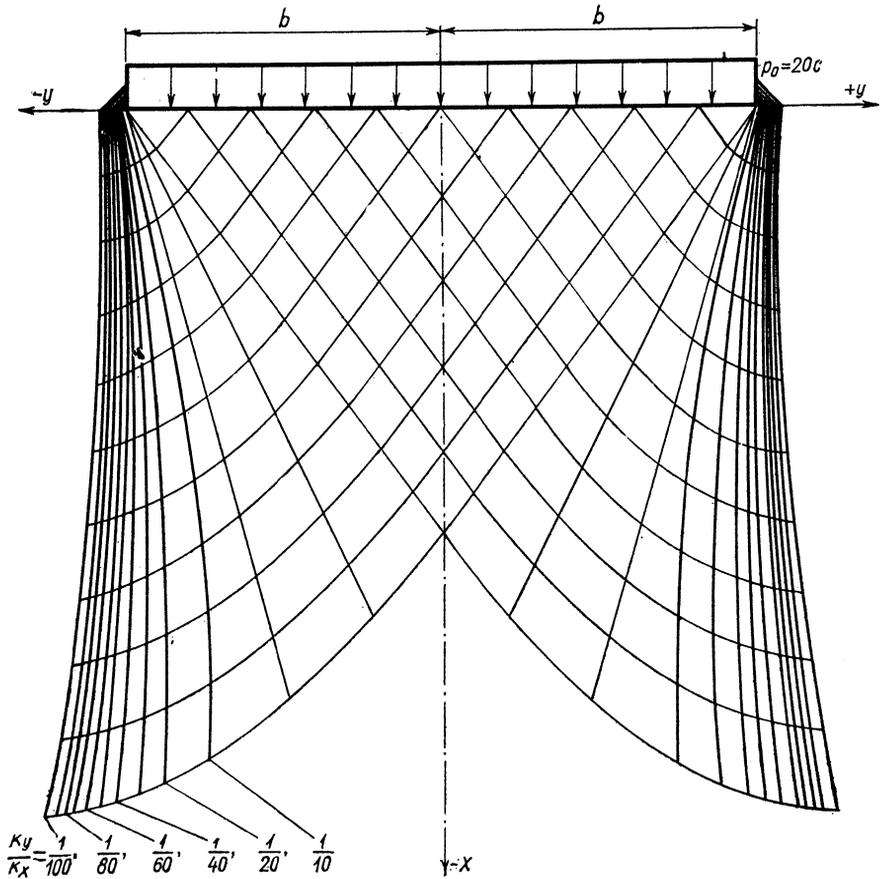


Рис. 3. Сетка линий скольжения для водонасыщенного анизотропного основания с преобладающей вертикальной водонепроницаемостью

$$\left( \frac{k_y}{k_x} = \frac{1}{100}, \varphi = 15^\circ, \gamma_{взв} = 0 \right).$$

$$\beta_1 = \beta'_1 = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}. \quad (28)$$

Из (26) видно, что при  $\frac{k_x}{k_y} = 1$   $\sigma_x = 0$ , а при  $\frac{k_x}{k_y} \rightarrow \infty$   $\sigma_x \rightarrow P_0$ . Изменение

$\sigma_x$  в зависимости от отношения  $\frac{k_x}{k_y}$  показано на рис. 2. На участке граничной поверхности при  $x=0$  и  $y>0$  напряжения  $\tau_{xy} = 0$ , а  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  неизвестны и подлежат определению. Из уравнения (22) получаем выражение для определения скачка внешней нагрузки в точке  $O$  ( $x=0, y>0$ ):

$$\frac{q_0 + \sigma_c}{1 - \sin \varphi} = \frac{p_0 \left( \frac{1 - \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}}{1 + \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}} \right) + \sigma_c}{1 + \sin \varphi} \cdot \exp(-\pi t g \varphi).$$



$x$	$y_{01}$	3							-0,130	-0,261	-0,391	-0,466	-0,534	-0,591	-0,635			
									-0,50	-0,40	-0,30	-0,242	-0,168	-0,078	+0,028			
$\sigma$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{100}$						0,654	0,654	0,654	0,654	0,480	0,305	0,130			
									10,82	10,24	9,321	7,538	5,486	2,80	0			
$\sigma$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{100}$						14,79	14,39	14,22	12,46	10,55	7,96	2,37			
									15,92	15,87	15,77	15,58	13,85	12,04	9,69			
$x$	$y_{01}$	4							-0,130	-0,261	-0,391	-0,521	-0,621	-0,712	-0,788	-0,84		
									-0,70	-0,60	-0,50	-0,40	-0,323	-0,224	-0,104	0,037		
$\sigma$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{100}$						0,654	0,654	0,654	0,654	0,654	0,48	0,305	0,131		
									10,88	10,48	9,933	9,152	7,397	5,380	2,733	0		
$\sigma$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{100}$						14,82	14,70	14,50	14,20	12,46	10,57	7,99	2,41		
									15,93	15,90	15,85	15,76	15,60	13,89	12,10	9,77		
$x$	$y_{01}$	5							-0,130	-0,261	-0,391	-0,521	-0,652	-0,776	-0,90	-0,986	-1,058	
									-0,90	-0,80	-0,70	-0,60	-0,50	-0,404	-0,281	-0,130	0,046	
$\sigma$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{100}$						0,654	0,654	0,654	0,654	0,654	0,654	0,48	0,305	0,131	
									10,90	10,57	10,18	9,686	9,026	7,303	5,326	2,722	0	
$\sigma$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{100}$						14,83	14,74	14,62	14,45	14,20	12,47	10,61	8,04	2,49	
									15,92	15,90	15,87	15,83	15,76	15,64	13,94	12,17	9,86	
$x$	$y_{01}$	6							-0,130	-0,261	-0,391	-0,521	-0,652	-0,782	-0,931	-1,068	-1,183	-1,270
									-1,10	-1,0	-0,90	-0,80	-0,70	-0,60	-0,485	-0,337	-0,156	0,055
$\sigma$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{100}$						0,654	0,654	0,654	0,654	0,654	0,654	0,48	0,305	0,131	
									10,88	10,57	10,27	9,914	9,482	8,924	7,242	5,315	2,764	0
$\sigma$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{100}$						14,82	14,74	14,66	14,56	14,41	14,20	12,51	10,66	8,13	2,59
									15,91	15,88	15,87	15,86	15,82	15,77	15,68	14,01	12,27	9,97



откуда

$$q_0 = \left[ p_0 \left( \frac{1 - \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}}{1 + \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}} \right) + \sigma_c \right] \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \exp(-\pi \operatorname{tg} \gamma) - \sigma_c.$$

Неизвестные функции  $x$ ,  $y$ ,  $\sigma$ ,  $\beta$  во всех узлах вычисляем по формулам (24) и (25). Выражения для объемных сил в этих формулах находим из (16) и (17).

На рис. 3 показана сетка линий скольжения для  $\varphi = 15^\circ$ ,  $\varphi_{взв} = 1$  и  $p_0 = 20$ .

В табл. 3 приведены для этой сетки результаты вычислений. Вычисления производились на ЭВМ «Минск-22» для следующих значений:  $\varphi = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ ;  $\frac{k_y}{k_x} = \frac{1}{100}; \frac{1}{90}; \frac{1}{80}; \frac{1}{70}; \frac{1}{60}; \frac{1}{50}; \frac{1}{40}; \frac{1}{30}; \frac{1}{20}; \frac{1}{10}$ .

Как видно из табл. 2, при угле внутреннего трения  $\varphi > 25^\circ$  имеет место предельное состояние грунта внутри массива.

Сравнение показывает на весьма значительные различия в величине пригрузки и очертании поверхностей скольжения. Начальное напряженное состояние при преобладании горизонтальной водопроницаемости оказывается значительно неблагоприятнее, чем напряженное состояние в более отдаленных стадиях. Для оснований с преобладающей вертикальной водопроницаемостью наиболее опасным является последующий период. Поэтому представляет интерес рассмотрение задачи предельного равновесия с учетом уплотнения.

#### Литература

1. Н. М. Герсеванов. Основы динамики грунтовой массы. М., 1934.
2. В. А. Флорин. Основы механики грунтов. Т. 2. М., 1961.
3. Ю. А. Соболевский, В. А. Рыжков. Распределение фильтрационных напряжений в анизотропных по водопроницаемости основаниях при быстром приложении полосовой нагрузки. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1972, № 2.
4. В. В. Соколовский. Статика сыпучей среды. М., 1954.