

Деформации армированного водонасыщенного основания дорожной конструкции

Т.В. Мальцева, А.В. Набоков, Ю.В. Огороднова

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Аннотация: В рамках кинематической модели получены расчетные формулы для определения деформации водонасыщенного основания из слабых грунтов с учетом вертикального армирования и несущей способности поровой воды. Теоретически обосновано применение вертикального армирования, направленного на усиление несущей способности грунтового основания.

Ключевые слова: слабый грунт, водонасыщенное основание автомобильной дороги, деформация, вертикальное армирование.

При возведении и эксплуатации нефтепромысловых дорог, прокладываемым по слабым обводненным грунтам, всегда стояла и будет стоять проблема надежности их функционирования. В значительной степени это относится к Западной Сибири, поскольку именно отсюда идет основной нефтяной поток на внутренние и международные рынки и часть ее территории представляет собой слабые грунты. Одним из решений проблемы является инженерное мероприятие по обеспечению несущей способности грунтового основания дорожной конструкции заключается в устройстве вертикальных дрен. В результате отвода воды скелет грунта уплотняется, и его несущая способность повышается. Часто применяют дорнит, расположенный горизонтально в основании насыпи автомобильной дороги. В работах [1-3] рекомендуется применять геосинтетические материалы путем укладки вертикальных полос вдоль подошвы насыпи автомобильной дороги и другие мероприятия [4-6] по повышению несущей способности грунтовых оснований, проводится оценка снижения прочности участков дорог [7]. Цель вертикального армирования заключается в предотвращении движения поровой воды в горизонтальном направлении. В результате горизонтальное перемещение поровой воды прекращается, и вода включается в восприятие внешней нагрузки.

Одной из актуальных задач строительства и эксплуатации остается анализ напряженно-деформированного состояния водонасыщенного грунтового основания в сложных геоклиматических условиях: на этапе проектирования – применение, по причине их отсутствия, качественных моделей, а на этапе эксплуатации - теоретического обоснования применения эффективных конструктивно-технологических решений усиления несущей способности грунтовых оснований с учетом влияния остаточного порового давления. В статье предлагается в рамках кинематической модели [8] получить расчетные формулы для определения деформации водонасыщенного основания из слабых грунтов с учетом вертикального армирования и несущей способности поровой воды, теоретически обосновать применение этого конструктивного решения, направленного на усиление несущей способности грунтового основания.

Применение приближенного метода В. З. Власова к решению задач о загрузке двухфазных оснований (скелет грунта+поровая вода) рассматривалось в работе [9], в которых напряженно-деформированное состояние двухфазного основания определялось в рамках одномерного варианта кинематической модели. В данной статье предлагается двумерная математическая модель обводненного основания автомобильной дороги. На основе метода получено обыкновенное дифференциальное уравнение четвертого порядка, описывающее эффект усиления несущей способности вертикально армированного основания за счет разгружающего влияния поровой воды.

Рассмотрим случай плоской деформации. Из двухфазного основания толщиной H выделим слой единичной толщины (рис. 1), загруженный на дневной поверхности нагрузкой интенсивностью $q(x)$.

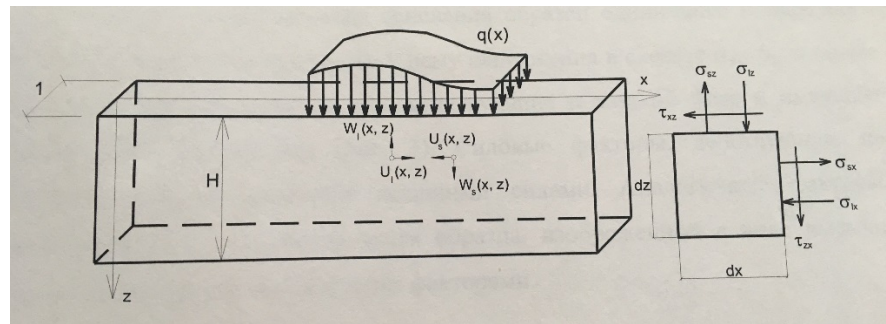


Рис. 1. – Слой водонасыщенного основания

В основании возникают вертикальные и горизонтальные перемещения в скелете грунта $w_s(x, y), u_s(x, y)$ и поровой воде $w_l(x, y), u_l(x, y)$ соответственно. Справа на дифференциально малом элементе показаны направления суммарных нормальных и касательных (только в скелете грунта) напряжений: $\sigma = \sigma_s - \sigma_l$. В сумме напряжений знаком «минус» подчеркивается разное правило знаков для скелета грунта и поровой воды (положительными в скелете грунта считаются растягивающие напряжения, а в поровой воде положительными – сжимающие напряжения).

Приведем систему уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние двухфазного слоя.

Уравнения равновесия

$$\frac{\partial(\sigma_{sx} - \sigma_{lx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial(\sigma_{sz} - \sigma_{lz})}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = 0;$$

физические уравнения для твердой и жидкой фаз

$$\sigma_{sx} = \frac{E_s(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\varepsilon_{sx} + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_{sz} \right) + \frac{E_{lx}}{N_x^2} \varepsilon_{sx},$$

$$\sigma_{sz} = \frac{E_s(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\varepsilon_{sz} + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_{sx} \right) + \frac{E_{lz}}{N_z^2} \varepsilon_{sz}, \quad \tau_{xz} = \frac{E_s}{2(1+\nu)} \gamma_{xz};$$

$$\frac{\partial \sigma_{lx}}{\partial x} = \frac{E_{lx}}{h_x} \varepsilon_{lx}, \quad \frac{\partial \sigma_{lz}}{\partial z} = \frac{E_{lz}}{h_z} \varepsilon_{lz};$$

уравнения взаимодействия скелета грунта и поровой воды

$$\varepsilon_{sx} = -N_x \varepsilon_{lx}, \quad \varepsilon_{sz} = -N_z \varepsilon_{lz};$$

геометрические уравнения

$$\varepsilon_{sx} = \frac{\partial u_s}{\partial x}, \quad \varepsilon_{lx} = \frac{\partial u_l}{\partial x}, \quad \varepsilon_{sz} = \frac{\partial w_s}{\partial z}, \quad \varepsilon_{lz} = \frac{\partial w_l}{\partial z}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u_s}{\partial z} + \frac{\partial w_s}{\partial x}.$$

В отличие от метода В.З. Власова для однофазного тела учет жидкой фазы описывается введением новых механических характеристик P_{lx} и P_{lz} , имеющих размерность напряжений [8]:

$$P_{lx} = \frac{\partial \sigma_{lx}}{\partial x} h_x = E_{lx} \varepsilon_{lx}, \quad P_{lz} = \frac{\partial \sigma_{lz}}{\partial z} h_z = E_{lz} \varepsilon_{lz}.$$

Выделим из двухфазного основания образец единичного поперечного сечения высотой H и приложим к нему напряжения в скелете грунта σ_{sx}, σ_{sz} и новые механические величины P_{lx}, P_{lz} , действующие в поровой воде, имеющие размерность напряжений (рис. 2). Силовые факторы, действующие по боковым граням, являются внешними силами. Силы, приложенные к внутренней части образца (выемке) являются внутренними.

Работа приращений внешних сил, приложенных к скелету грунта и поровой воде, в направлении, параллельном оси OX , будет записываться для одномерного случая. Работа внутренних сил, действующих в направлении, параллельном оси OZ , также будет записана для одномерного случая.

Введение двух одномерных случаев вместо двумерного варианта является характерной особенностью в методе В.З. Власова. Другая характерная особенность заключается в том, что перемещение

представляется в виде произведения двух функций, каждая из которых зависит только от одного аргумента: либо x , либо z :

$$u_l = U_l(x)\varphi_l(z), \quad w_l = W_l(x)\psi_l(z);$$

$$u_s = U_s(x)\varphi_s(z), \quad w_s = W_s(x)\psi_s(z).$$

Функции, зависящие от аргумента x , имеют размерность метры, а функции, зависящие от z – безразмерные.

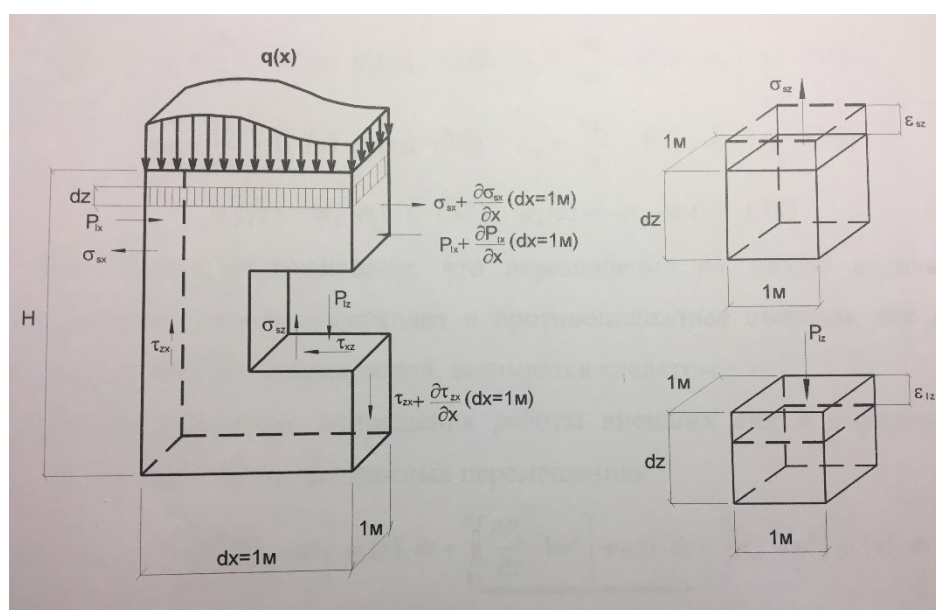


Рис.2. — Образец водонасыщенного основания

Допустим, что

$$U_l(x) = U_s(x), \quad W_l(x) = W_s(x).$$

В дальнейшем индексы l и s опустим. По формулам Коши имеем:

$$\varepsilon_{lx} = \frac{\partial u_l}{\partial x} = U'(x)\varphi_l(z), \quad \varepsilon_{lz} = \frac{\partial w_l}{\partial z} = W(x)\psi_l'(z);$$

$$\varepsilon_{sx} = \frac{\partial u_s}{\partial x} = U'(x)\varphi_s(z), \quad \varepsilon_{sz} = \frac{\partial w_s}{\partial z} = W(x)\psi_s'(z);$$

$$\varphi_s(z) = -N_x\varphi_l(z), \quad \psi_s(z) = -N_z\psi_l(z).$$

Знак минус указывает, что перемещение на малую величину частиц поровой воды и скелета грунта происходит в противоположные стороны, так как часть объема, освобожденная водой, занимает скелетом грунта.

Уравнения приращения работ внешних и внутренних сил на возможных горизонтальных и возможных вертикальных перемещениях сводятся к системе дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} AU''(x) + BW'(x) - CU(x) = 0 \\ DW''(x) - BU'(x) - EW(x) + q(x) = 0. \end{cases}$$

Здесь используются следующие обозначения

$$\begin{aligned} A &= \left(\frac{E_s(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} + \frac{2E_{lx}}{N_x^2} \right) a_{11}, & a_{11} &= \int_0^H \varphi_s^2(z) dz, \\ B &= \frac{F_s \nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} t_{12} - \frac{F_s}{2(1+\nu)} e_{12}, & t_{12} &= \int_0^H \psi_s'(z) \varphi_s(z) dz, \\ C &= \frac{E_s}{2(1+\nu)} b_{11}, & e_{12} &= \int_0^H \varphi_s'(z) \psi_s(z) dz, & b_{11} &= \int_0^H \varphi_s'^2(z) dz, \\ D &= \frac{E_s}{2(1+\nu)} r_{11}, & r_{11} &= \int_0^H \psi_s^2(z) dz, \\ E &= \left(\frac{E_s(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} + \frac{2E_{lx}}{N_x^2} \right) s_{11}, & s_{11} &= \int_0^H \psi_s'^2(z) dz, \end{aligned}$$

Система двух дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами сводится к одному дифференциальному уравнению, но при этом повышается порядок дифференциального уравнения до четвертого:

$$P^{IV}(x) - GP''(x) + JP(x) = 0, \quad G = \frac{CD + AE - B^2}{AD}, \quad J = \frac{CE}{AD}.$$

Решение дифференциального уравнения имеет вид

$$P(x) = C_1 e^{-k_1 x} + C_2 e^{-k_2 x},$$

где

$$k_1 = \sqrt{\frac{G + \sqrt{G^2 - 4J}}{2}}, \quad k_2 = \sqrt{\frac{G - \sqrt{G^2 - 4J}}{2}}.$$

Граничные условия с учетом вертикального армирования.

В методе В.З. Власова граничное условие записывается как уравнение равенства работ внешней и внутренней сил на возможных перемещениях $\psi_s(z)$:

$$\frac{F}{2} \psi_s(z=0) = - \int_0^H \tau_{zx} \psi_s(z) dz.$$

От сосредоточенной силы F переходим к распределенной нагрузке q с помощью операции интегрирования, далее применяем второе граничное условие.

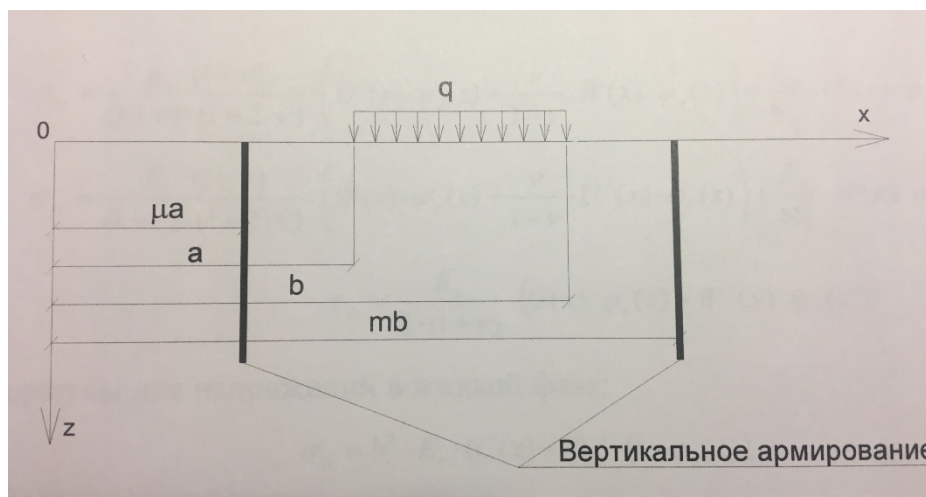


Рис.3. — Армированное водонасыщенное грунтовое основание

Второе граничное условие отражает нулевые возможные перемещения в месте установки вертикального армирования (рис.3):

$$U_I(x, z)|_{x=\mu a} = 0, \quad U_I(x, z)|_{x=mb} = 0.$$

Приведем окончательные формулы для горизонтальных перемещений дневной поверхности при $q = const$:

$$a \leq x \leq b$$

$$U(x) = \frac{Bq(1+\nu)}{E_s R} [(-e^{-k_1(x-a)} + e^{k_1(x-b)}) - L(-e^{-k_2(x-a)} + e^{k_2(x-b)})];$$

$$W(x) = -\frac{q(1+\nu)}{E_s R} \left[\frac{(C - Ak_1^2)}{k_1} (2 - e^{-k_1(x-a)} - e^{k_1(x-b)}) - L \frac{(C - Ak_2^2)}{k_2} (2 - e^{-k_2(x-a)} - e^{k_2(x-b)}) \right].$$

$$x \geq b$$

$$U(x) = \frac{Bq(1+\nu)}{E_s R} [(-e^{-k_1(x-a)} + e^{-k_1(x-b)}) - L(-e^{-k_2(x-a)} + e^{-k_2(x-b)})],$$

$$W(x) = -\frac{q(1+\nu)}{E_s R} \left[\frac{(C - Ak_1^2)}{k_1} (-e^{-k_1(x-a)} + e^{-k_1(x-b)}) - L \frac{(C - Ak_2^2)}{k_2} (-e^{-k_2(x-a)} + e^{-k_2(x-b)}) \right].$$

$$x \leq a$$

$$U(x) = \frac{Bq(1+\nu)}{E_s R} [(-e^{k_1(x-a)} + e^{k_1(x-b)}) - L(-e^{k_2(x-a)} + e^{k_2(x-b)})],$$

$$W(x) = -\frac{q(1+\nu)}{E_s R} \left[\frac{(C - Ak_1^2)}{k_1} (e^{k_1(x-a)} - e^{k_1(x-b)}) - L \frac{(C - Ak_2^2)}{k_2} (-e^{k_2(x-a)} + e^{k_2(x-b)}) \right].$$

Таким образом, на основании метода В.З. Власова, который применяется для приближенного решения уравнений Ламе для упругого однофазного тела [10], разработана двумерная математическая модель слабого водонасыщенного основания автомобильной дороги с учетом вертикального армирования, позволяющая аналитически определять деформации основания. Полученные формулы для определения

перемещений являются приближенным решением обобщенных уравнений Ламе. Более подробно о системе обобщенных уравнений Ламе и свойствах их решений изложено в работе [11].

За счет вертикального армирования расчетная осадка дневной поверхности водонасыщенного грунтового основания уменьшается на 28%.

Литература

1. Usmanov R., Mrdak I., Vatin N., Murgul V. Reinforced soil beds on weak soils // Applied Mechanics and Materials, 2014. DOI:10.4028.scientific.net/AMM.633-634.932
2. Kudriavtcev S., Kazharsky A., Maleev D., Tsvigunov D., Trapeznikov V. Research into vertical axial elements in seasonally frozen grounds // MATEC Web of Conferences 2018. С. 03043. DOI: doi.org/10.1051/matecconf/201819303043
3. Kudriavtcev S., Bugunov S., Kotenko Z., Pogulyaeva E. Investigation of light embankment on weak soils // MATEC Web of Conferences 2018. С. 03044. DOI: doi.org/10.1051/matecconf/201819303044
4. Кушнарева Н.В., Григорьев Д.О., Мут А.Д., Кудрявцев С.А. Численное моделирование процесса промерзания-оттаивания насыпей и усиленных геоячейками оснований автомобильной дороги // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран ТР в XXI веке. 2017. Т. 2.С.50-53.
5. Кудрявцев С.А., Вальцева Т.Ю., Гончарова Е.Д. Разработка конструкций для укрепления оползневого массива грунта на участке автомобильной дороги «Амур» с использованием современных геотекстильных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура.2016.Т.7. № 4.С.111-122.

6. Сафарян В.С., Бай В.Ф., Коркишко А.Н., Чухлатый М.С. Отдельно стоящие фундаменты с неплоской подошвой // Инженерный вестник Дона. 2019. № 3. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n3y2019/5870
7. Тиратурян А.Н., Ольховой С.А. Оценка деградации прочности нежестких дорожных конструкций на основе натурных измерений на участке автомобильной дороги М4 «Дон» п. Тарасовский // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2015/4160
8. Мальцева Т.В., Трефилина Е.Р. Моделирование двухфазного тела с учетом несущей способности жидкой фазы // Математическое моделирование. 2004. Т. 16. № 11. С. 47-57.
9. Огороднова Ю.В. Сопротивление двухфазной среды воздействию статических нагрузок: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тюмень: 2004. 127 с.
10. Власов В.З., Леонтьев Н.Н. Балки, плиты, оболочки на упругом основании. М.: Госиздат физ.-мат. литературы. 1960. 492 с.
11. Мальцева Т.В. Математическая теория водонасыщенного грунта. Тюмень: Вектор Бук. 2012. 240 с.

References

1. Usmanov R., Mrdak I., Vatin N., Murgul V. Reinforced soil beds on weak soils. Applied Mechanics and Materials, 2014. DOI:10.4028/.scientific.net/AMM.633-634.932
 2. Kudriavtcev S., Kazharsky A., Maleev D., Tsvigunov D., Trapeznikov V. Research into vertical axial elements in seasonally frozen grounds. MATEC Web of Conferences, 2018. DOI: doi.org/10.1051/matecconf/201819303043
 3. Kudriavtcev S., Bugunov S., Kotenko Z., Pogulyaeva E. Investigation of light embankment on weak soils. MATEC Web of Conferences, 2018. DOI: doi.org/10.1051/matecconf/201819303044
-



4. Kushnareva N.V., Grigor'ev D.O., Mut A.D., Kudrjavcev S.A. Nauchno-tehnicheskoe i jekonomicheskoe sotrudnichestvo stran TR v XXI veke (Rus). 2017. T. 2. pp.50-53.
5. Kudrjavcev S.A., Val'ceva T.Ju., Goncharova E.D. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. 2016. T. 7. № 4.
6. Safarjan V.S., Baj V.F., Korkishko A.N., Chuhlatyj M.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019. № 3. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n3y2019/5870
7. Tiraturjan A.N., Ol'hovoj S.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017. № 2. URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2015/4160
8. Mal'ceva T.V., Trefilina E.R. Matematicheskoe modelirovanie (Rus). 2004. T. 16. № 11.
9. Ogorodnova Ju.V. Soprotivlenie dvuhfaznoj sredy vozdeystviyu staticheskikh nagruzok [Resistance of a two-phase medium to static loads]: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk. Tjumen': 2004. 127 p.
10. Vlasov V.Z., Leont'ev N.N. Balki, plity, obolochki na uprugom osnovanii [Beams, plates, shells on an elastic base]. M.: Gosizdat fiz.-mat.literatury. 1960. 492 p.
11. Mal'ceva T.V. Matematicheskaja teorija vodonasyshhennogo grunta [The mathematical theory of saturated soil]. Tyumen: Vektor Buk. 2012. 240 p.