

Выдавливание слабого слоя грунта из сжимаемой толщи основания фундаментов конечной ширины

УДК 624.151.2:624.131.54

Тер-Мартirosян З.Г.

Д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва); e-mail: gic-mgsu@mail.ru

Тер-Мартirosян А.З.

Д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва); e-mail: gic-mgsu@mail.ru

Демьяненко В.И.

Аспирант ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва); e-mail: demianenkovi@gmail.com

Статья получена: 04.12.2019. Рассмотрена: 08.12.2019. Одобрена: 21.12.2019. Опубликовано онлайн: 31.12.2019. ©РИОР

Аннотация. В работе дается количественная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) основания фундамента конечной ширины, в сжимаемой толще которого находится слабый слой глинистого грунта. Приводятся критерии оценки возможности или невозможности выдавливания слабого слоя в зависимости от его прочностных и реологических свойств, а также относительной толщины слоя к его длине (h/l) и относительной глубины расположения слоя (h/d). Приводятся замкнуто-аналитические решения по опре-

делению скорости осадки фундамента в зависимости от скорости выдавливания слабого слоя, в том числе с учетом затухающей и незатухающей ползучести. Аналитические решения в статье подкреплены графической частью, выполненной с помощью программы *Mathcad*. Приведены эпюры изменения касательных напряжений в слое вдоль оси x на разных расстояниях от оси и при разных значениях α_0 , изолинии скоростей горизонтального перемещения в слабом слое на разных расстояниях от оси x , эпюры скоростей горизонтальных

CONCERNING THE EXTRACTION OF A SLACK SOIL LAYER FROM COMPRESSIBLE THICKNESS OF FOUNDATION STRATUM OF FINITE WIDTH FOUNDATIONS

Ter-Martirosyan Z.G.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow; e-mail: gic-mgsu@mail.ru

Ter-Martirosyan A.Z.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow; e-mail: gic-mgsu@mail.ru

Demyanenko V.I.

Postgraduate Student, Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow; e-mail: demianenkovi@gmail.com

Manuscript received: 04.12.2019. **Revised:** 08.12.2019. **Accepted:** 21.12.2019. **Published online:** 31.12.2019. ©RIOR

Abstract. The paper provides a quantitative assessment of the deflected mode of foundation stratum of finite width foundation, in the compressible thickness of which there is a slack clay soil layer. A number of criteria for assessing the possibility or impossibility of extruding a slack layer depending on its strength and rheological properties, as well as the relative thickness of the layer to its length (h/l) and the relative depth of the layer (h/d) have been given. Closed analytical solutions are given to determine

the rate of Foundation precipitation depending on the rate of extrusion of the weak layer, including taking into account the damped and undamped creep. The analytical solutions in the article are supported by the graphical part made with the help of the Mathcad program. Plots of changes in shear stresses in the layer along the x axis at different distances from the axis and at different values α_0 , contours of horizontal displacement velocities in the weak layer at different distances from the x axis, plots of horizontal displacement velocities in the middle of the weak layer and plots of horizontal displacement velocities in the weak layer at different distances from the x axis are given. As a calculation model for describing the creep of a slack layer, rheological ones of the soil using power and hyperbolic functions and their modifications have been considered. In addition, most modern rheological models that take into account soil hardening during creep have been considered. Based on these models, the problem is solved by means analytical and numerical methods using the Mathcad PC and the PLAXIS PC according to the Soft Soil Creep model. The graphical part shows the isofields of horizontal displacements for 300 days and 600 days and the corresponding contours of horizontal displacements.

Keywords: soft soil, creep, foundation, deflected mode, rheology, SoftSoilCreep.

смещений в середине слабого слоя и эпюры скоростей горизонтальных смещений в слабом слое на разных расстояниях от оси x . В качестве расчетной, для описания ползучести слабого слоя рассматривается реологическая модель Максвелла. На ее основе решается поставленная задача аналитическим и численным (МКЭ) и методами с помощью ПК *Mathcad* и ПК *PLAXIS* по общеизвестной модели *SoftSoilCreep*. В графической части приводятся изополя горизонтальных перемещений за 300 и 600 дней и соответствующие им изолинии горизонтальных перемещений.

Ключевые слова: слабый грунт, ползучесть, фундамент, напряженно-деформированное состояние, реология, *SoftSoilCreep*.

Введение

При наличии в толще фундаментов слабых грунтов¹ (илы, текучие пылевато-глинистые грунты, торф, заторфованные, малоуплотненные грунты), обладающих низкой несущей способностью и повышенной сжимаемостью, возникает необходимость дать количественную оценку несущей способности и осадкам таких оснований с целью определения невозможности или возможности использования их в качестве естественных оснований². В случае невозможности использования слабого слоя, экономичней может оказаться замена слабого грунта другим при неглубоком его залегании, а также песчаными или щебеночными сваями или подушками, сваями-дренами, в том числе на глубине [5; 6].

Настоящая работа посвящена количественной оценке скорости осадки фундамента, обусловленной выдавливанием слабого слоя грунта из сжимаемой толщи основания аналитическим и численным (МКЭ) методами [2; 8–10]. Для слабого слоя в качестве расчетного варианта рассматривается реологическая модель Максвелла³. Расчетная схема поставленной задачи приведена на рис. 1. Приводится также численное моделирование процесса выдавли-

вания слабого слоя во времени с использованием ПК *PLAXIS* по программе *SoftSoilCreep*.

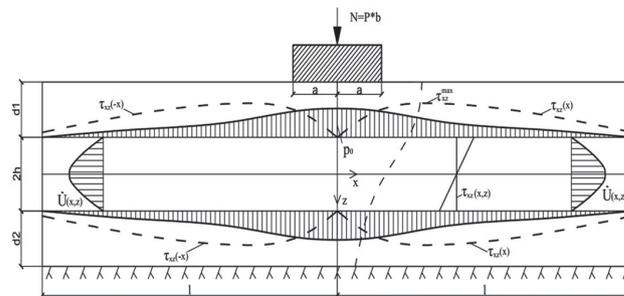


Рис. 1. Расчетная схема аналитического решения.

Обозначения: a — половина ширины фундамента; b — ширина фундамента; N — распределенная нагрузка на фундамент; P — сосредоточенная нагрузка на фундамент; d — мощность сильного слоя; h — половина мощности слабого слоя; p_0 — максимальное значение нормальных напряжений на оси z ; τ_{xz} — касательные напряжения; $\dot{U}(x, z)$ — скорость выдавливания слабого слоя

Fig. 1. Calculation scheme of analytical solution. Designation: a — half the width of Foundation; b — width of Foundation; N — distributed load on the Foundation; P — concentrated load on the Foundation; d — the capacity of the strong layer; h — half the power of the weak layer; p_0 — is the maximum value of normal stress on z axis; τ_{xz} — shear stresses; $\dot{U}(x, z)$ — the velocity of extrusion of the weak layer

Исходные уравнения

В качестве расчетной для аналитического решения поставленной задачи рассмотрены реологические модели, в том числе модель Максвелла [1, 4, 5].

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta(t)} + \frac{\dot{\tau}}{G}, \quad (1)$$

где $\dot{\gamma}$ — скорость угловой деформации грунтов слабого слоя (1/сек); τ — действующее значение касательных напряжений в слое ($\text{кН}/\text{м}^2$); $\eta(t) = \eta_0 \cdot f(t)$ — изменяющаяся во времени вязкость слабого слоя, измеряемая в Пуазах (П), причем $1 \cdot (\text{Пуаз}) = (\text{кН}/\text{м}^2 \cdot \text{сек})$. В слабых грунтах вязкость колеблется в пределах 10^8 – 10^{12} П.

Напряженное состояние основания рассматривается по Фламану⁴, т.е. задача о действии распределенной нагрузки $p = \text{const}$ на поверхности грунтового полупространства по полосе

¹ Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В., Тер-Мартirosян З.Г., Чернышев С.Н. Механика грунтов, основания и фундаменты. М.: Высшая школа, 2007.

² Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. М.: Высшая школа, 1982.

³ Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978.

⁴ Тер-Мартirosян А.З. Взаимодействие фундаментов зданий и сооружений с водонасыщенным основанием при учете нелинейных и реологических свойств грунтов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: Изд-во НИУ МГСУ, 2016.

шириной (плоская деформация) рассчитывается по формуле:

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi} \cdot \left(\operatorname{arctg} \frac{a-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{a+x}{z} \right) - \frac{2ap}{\pi} \cdot \frac{z(x^2 - z^2 - a^2)}{(x^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2z^2} \quad (2),$$

$$\tau_{xz} = \frac{4ap}{\pi} \cdot \frac{xz^2}{(x^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2z^2},$$

где σ_z — нормальные напряжения по оси z (кН/м²); p — распределенная нагрузка на поверхности грунтового полупространства; a, x, z — геометрические характеристики; τ_{xz} — касательные напряжения.

Из анализа формул 1 и 2 следует, что их использование неудобно для решения поставленной задачи, обусловленное необходимостью их дифференцирования и интегрирования по ходу решения поставленной задачи. Вместе с тем эпюры $\sigma_z(x, z = \text{const})$ и $\tau_{xz}(x, z = \text{const})$ представляют сравнительно простую форму, аналогичную рис. 1. Сравнительный анализ с кривой Гаусса в виде $\sigma_z = p_0 \cdot e^{-\alpha_0 x^2}$ с эпюрой $\sigma_{zp}(x) = p_0 \cdot e^{-\alpha_0 x^2}$, по Фламану, показал их хорошую сходимость при удовлетворении условия равенства площадей эпюр $\sigma_z(x, z = \text{const})$ и распределенной нагрузки $p \cdot b$, поэтому в настоящей работе для описания напряжения $\sigma_z(x, z = \text{const})$ используется эквивалентная формула Гаусса:

$$\sigma_{zp}(x) = p_0 \cdot e^{-\alpha_0 x^2}, \quad (3)$$

где α_0 — параметр экспоненты; p_0 — максимальное значение σ_z на оси z ($x = 0$) на глубине $z = d$ (см. рис. 1) и определяется по таблицам свода правил СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» или научных публикаций [7] по механике грунтов через коэффициент K_z^4 , где

$$K_z = f\left(\frac{x}{a}, \frac{z}{b}\right), \text{ т.е. } p_0 = K_z \cdot p. \quad (4)$$

Эквивалентность такой замены обеспечивается уравнением равновесия следующего вида

$$p \cdot b = \int_{-l}^{+l} e^{-\alpha_0 x^2} dx \approx p_0 \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_0}} \text{ при } 1 \gg b \quad (5)$$

Отсюда следует, что

$$\alpha_0 = \pi \cdot \left(\frac{p_0}{p \cdot b} \right)^2. \quad (6)$$

Напряженно-деформированное состояние (НДС) слоя определяется из условия его несжимаемости, полагая, что он находится в упруго-вязко-пластическом состоянии, и что в интервале $x \leq \pm l \dot{\epsilon}_x = \dot{\epsilon}_z = 0$, а в поперечном сечении слоя $\sigma_z(z) = \text{const}$, причем $\sigma_x = \sigma_z = p(x) = p_0 \cdot e^{-\alpha_0 x^2}$. Из условия равновесия элементарной длины слоя dx следует, что

$$\tau_{xz}(x) = \frac{dp}{dx} \cdot z, \quad (7)$$

где x и z определяются в соответствии с началом координат в центре слоя (см. рис. 1).

Дифференцируя (3) по x и подставляя в (7) получено выражение (рис. 2):

$$\tau_{xz}(x) = -2p_0 \cdot \alpha_0 \cdot x \cdot z \cdot e^{-\alpha_0 x^2}. \quad (8)$$

Решение поставленной задачи и определение начальной критической нагрузки на фундамент

Скорость выдавливания слоя $\dot{\gamma}(1)$ на основании определяется при предположении, что в слое имеет место простой сдвиг $\dot{\gamma} = \frac{d\dot{u}}{dz}$, т.е.

$$\dot{u}(x, z) = \int \dot{\gamma}(x, z) dz + C, \quad (9)$$

где \dot{u} — скорость выдавливания слоя; C — постоянная интегрирования, определяется из граничного условия $z = \pm h$.

Из условия $\dot{\tau}_{xz}(x, 0) = 0$ определено значение x^* , при котором $\tau_{xz}(x, 0)$ принимает максимальное значение. Дифференцируя τ_{xz} из (8), получено выражение:

$$2\alpha_0 p_0 h (1 - 2x^2 \alpha_0) = 0. \quad (10)$$

Отсюда следует, что

$$x^* = \frac{1}{\sqrt{2\alpha_0}}. \quad (11)$$

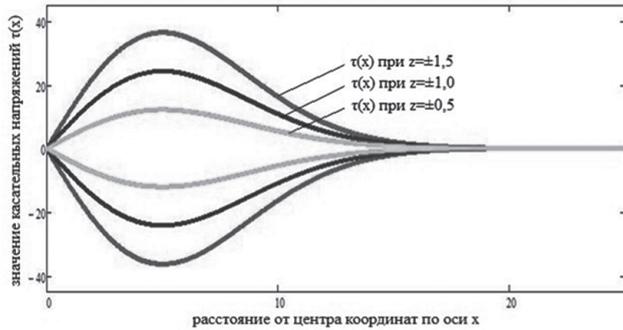


Рис. 2. Эпюры изменения касательных напряжений в слое вдоль x на разных $z = const$ по (8) при $\alpha_0 = 0,02$; $z = \pm 1,5; \pm 1; \pm 0,5$. Обозначения: красная линия — значение касательных напряжений при $z = \pm 1,5$, синяя линия — значение касательных напряжений при $z = \pm 1,0$, зеленая линия — значение касательных напряжений при $z = \pm 0,5$

Fig. 2. Diagrams of shear stress changes in the layer along x at different $z = const$ by (8) at $\alpha_0 = 0,02$; $z = \pm 1,5; \pm 1; \pm 0,5$. Designation: red line — value of tangential stresses at $z = \pm 1,5$, blue line — value of tangential stresses at $z = \pm 1,0$, green line — value of tangential stresses at $z = \pm 0,5$

При подстановке x^* из (11) в (8), получено максимальное τ_{xz}^{max} , которое в предельном состоянии будет равно $\sigma_z^{max}(x) \cdot tg\varphi + c$, где φ — угол трения, c — сцепление. При преобразовании полученного выражения τ_{xz}^{max} начальная критическая нагрузка на фундамент примет вид:

$$p_{нк}^* = \frac{A}{K(z/b) \cdot \left[e^{-\alpha/2} \left(2a_0 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2a_0}} - tg\varphi \right) \right) \right]} \quad (12)$$

Скорость осадки фундамента при выдавливании слабого слоя по вязкоупругой модели Максвелла

Скорость угловой деформации в слабом слое определяется по (1) в виде:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau_{xz}}{\eta(t)} + \frac{\dot{\tau}_{xz}}{G}, \quad (13)$$

где $\dot{\tau}_{xz}$ — касательные напряжения; G — модуль сдвига.

При постоянстве $\tau_{xz} = const$, $\dot{\tau}_{xz} = 0$ из (25) получено выражение:

$$\dot{\gamma}_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{\eta(t)}. \quad (14)$$

Подставляя это значение $\dot{\gamma}_{xz}$ в (9) после интегрирования с учетом $C = 0$ получена скорость выдавливания слабого слоя по x и по z (рис. 3–5) в виде:

$$\dot{u}(x, z) = \frac{P_0 \cdot \alpha_0 \cdot x \cdot e^{-\alpha x^2}}{\eta(t)} \cdot (h^2 - z^2). \quad (15)$$

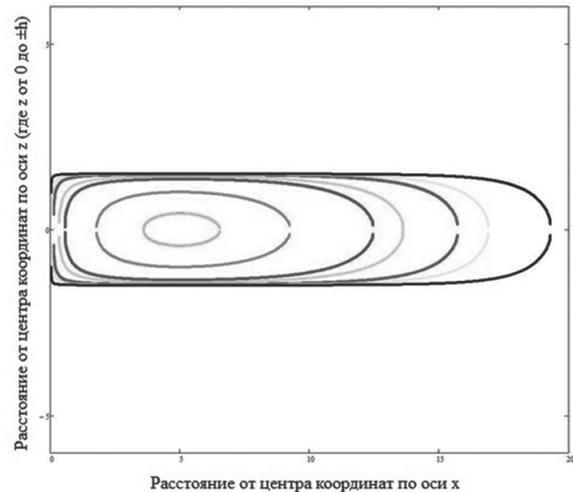


Рис. 3. Изолинии скоростей горизонтального перемещения в слабом слое (правая сторона рис. 1) рассчитаны по (15). Обозначения: изолинии скоростей горизонтального перемещения показаны цветами условно, от максимальной скорости — изолиния голубого цвета, до минимальной — изолиния черного цвета

Fig. 3. Contours of the horizontal velocity of displacement in the weak layer (right side of Fig. 1) calculated by (15). Designation: the horizontal velocity isolines are shown by colors conditionally, from the maximum speed — the blue color isoline, to the minimum — the black color isoline

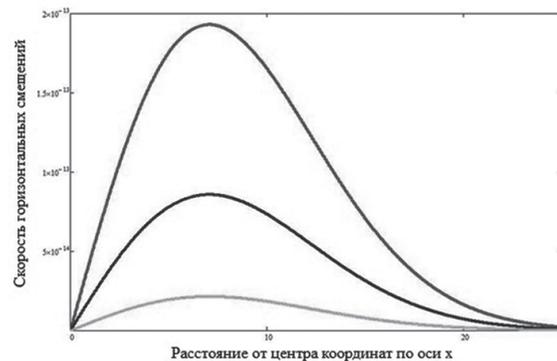


Рис. 4. Эпюры скоростей горизонтальных смещений в середине слабого слоя (правая сторона). Обозначения: эпюры скоростей горизонтального смещения показаны цветами условно, от максимальной скорости — линия красного цвета, до минимальной — линия зеленого цвета



Рис. 5. Эпюры скоростей горизонтальных смещений $U(z)$ в слабом слое на разных расстояниях от оси $x = 0$ (правая сторона). Обозначения: красная линия — максимальное значение скорости горизонтальных перемещений в зависимости от x

Fig. 5. Velocity plots of horizontal displacements $U(z)$ in the weak layer at different distances from the $x = 0$ axis (right side). Designation: the red line is the maximum value of the speed of horizontal movements depending on x

Средняя скорость выдавливания слабого слоя в поперечном сечении получена следующим образом

$$\bar{u} = \frac{P_0 \cdot \alpha_0 \cdot x \cdot e^{-\alpha x^2}}{\eta(t)} \cdot \int_0^h \frac{(h^2 - z^2) dz}{h} \quad (16)$$

Выражение принимает вид:

$$\bar{u}(z) = \frac{P_0 \cdot \alpha_0 \cdot x \cdot e^{-\alpha x^2}}{\eta(t)} \cdot \frac{2 \cdot h^3}{3}, \quad (17)$$

где $\bar{u}(z)$ — средняя скорость выдавливания слабого слоя в поперечном сечении (м/сек).

При определении средней скорости еще и по длине слоя $x = \pm l$, получено:

$$\bar{u}(x, z) = \frac{P_0 \cdot 2 \cdot h^2 \cdot \alpha_0}{3 \cdot l \cdot \eta(t)} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{4 \cdot (2\alpha)^{0.5}}, \quad (18)$$

где $\bar{u}(x, z)$ — средняя скорость по длине слоя (м/сек), l — длина слоя (м).

Таким образом, получена средняя скорость выдавливания слабого слоя и по поперечному сечению $z = \pm h$ и по длине слоя $x = \pm l$, т.е. скорость сокращения объема слабого слоя ($2h \times 2l$) вследствие выдавливания грунта будет равна

$$\dot{Q}(t) = (2l \times 2h) \cdot \bar{u}(x, z). \quad (19)$$

Учитывая, что скорость изменения объема выдавливаемого грунта \dot{Q} равна скорости изменения объема мульды оседания при $x > \pm 0$, то следует определять скорость выдавливания эпюры мульды оседания, которая при действии гибкой нагрузки по полосе шириной $b = 2a$

определяется по формуле Надаи [3] следующим видом:

$$\dot{S}(x) = \frac{(1 - \nu) \cdot p}{\pi \cdot \eta(t)} \times \left[(x - a) \cdot \ln(x - a)^2 - (x + a) \cdot \ln(x + a)^2 \right]. \quad (20)$$

При $x = 0$ получено:

$$\dot{S}_0^{\max} = \frac{(1 - \nu) \cdot p}{\pi \cdot \eta(t)} \cdot \ln \left[(a^2)^{-2a} \right], \quad (21)$$

где \dot{S}_0^{\max} — скорость выдавливания эпюры мульды оседания (м/сек) при $x = 0$, ν — коэффициент Пуассона.

Скорость объема мульды оседания:

$$\dot{V} = 2 \cdot \int_0^l \dot{S}(x) dx, \quad (22)$$

где $\dot{S}(x)$ — скорость выдавливания эпюры мульды оседания (м/сек), \dot{V} — скорость объема мульды оседания (м³/сек).

Подставляя значение $\dot{S}(x)$ из (20) в (22) после интегрирования получено выражение:

$$\begin{aligned} & \int_0^l (x + a) \cdot \ln(x + a)^2 d(x + a) = \\ & = \frac{(x + a)^2 \cdot (\ln(x + a))^2}{2} \Big|_0^l - \\ & - \int_0^l (x + a) \cdot \ln(x + a) d(x + a) = \\ & = \frac{(x + a)^2 \cdot (\ln(x + a))^2}{2} \Big|_0^l - (x + a)^2 \times \\ & \times \left[\frac{\ln(x + a)}{2} - \frac{1}{4} \right] \Big|_0^l = \\ & = \frac{(l + a)^2 \cdot (\ln(l + a))^2}{2} - \frac{a^2 \cdot (\ln a)^2}{2} - \\ & - (l + a)^2 \left(\frac{\ln(l + a)}{2} - \frac{1}{4} \right) + \frac{a^2 \ln a}{2} - \frac{1}{4} = \\ & = \frac{1}{2} \cdot \left((l + a)^2 \cdot (\ln(l + a))^2 - a^2 \cdot (\ln a)^2 - \right. \\ & \left. - (l + a)^2 \cdot \ln(l + a) + a^2 \cdot \ln a \right). \end{aligned}$$

И окончательно:

$$\dot{V} = \frac{(1-\nu) \cdot p}{\pi \cdot \eta(t)} \cdot \left\{ (l+a)^2 \cdot (\ln(l+a))^2 - (l+a)^2 \cdot \ln(l+a) - a^2 \cdot (\ln a)^2 + a^2 \ln a \right\} \quad (23)$$

Приравнявая (19) и (23) получена скорость изменения объема мульды оседания поверхности $z = 0$:

$$\dot{u}(x, z) = \frac{(1-\nu) \cdot p}{\pi \cdot \eta(t)} \cdot \left\{ (l+a)^2 \cdot (\ln(l+a))^2 - (l+a)^2 \cdot \ln(l+a) - a^2 \cdot (\ln a)^2 + a^2 \cdot \ln a \cdot \frac{1}{l \cdot h} \right\} \quad (24)$$

Очевидно, что в зависимости вида функции $\eta(t)$ скорость осадки фундамента во времени изменится. Величину осадки поверхности можно определить интегрированием, в пределах $0 - t$, т.е.

$$V(t) = \int V(t) d(t), \quad (25)$$

где V — объем мульды оседания (m^3); t — временной интервал.

Отмечается, что наиболее распространенными видами функции $\eta(t)$ являются:

$$\eta(t) = \eta_0 = Const; \quad \eta(t) = \eta_0 \cdot e^{at};$$

$$\eta(t) = \eta_0 \cdot \ln \frac{t}{t_0}, \quad (26)$$

где t_0 — временной интервал.

Численное моделирование скорости выдавливания слабого слоя по ПК PLAXIS по модели SoftSoilCreep

Для описания процессов ползучести в грунтах в ПК PLAXIS по программе SoftSoilCreep в качестве расчетной принята следующая схема (рис. 6).

Параметры расчетной модели определяются по результатам испытаний в одометре.

Приведены результаты численного моделирования НДС слабого слоя (рис. 7), находящегося в пределах сжимаемой толщи в основании фундамента конечной ширины.

Фундамент шириной $b = 5$ м, высотой 1 м. Слабый слой основания, мощностью $2h = 3$ м,

находящийся между двумя одинаковыми по характеристикам слоями, с более высокими прочностными характеристиками, мощность каждого равна 5 м.

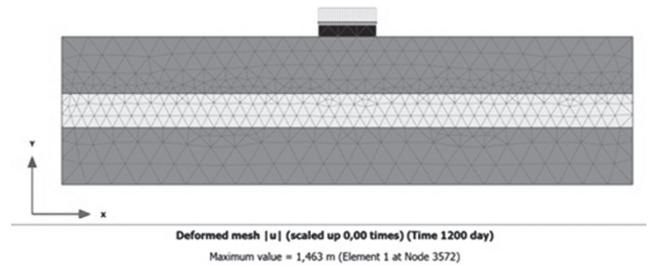


Рис. 6. Расчетная схема для определения скорости осадки фундамента в ПК PLAXIS 2d. Обозначения: черный цвет — фундамент, фиолетовый цвет — сильный слой грунта, желтый цвет — слабый слой грунта
 Fig. 6. Calculation scheme for determining the rate of Foundation precipitation in PC PLAXIS 2d. Designation: black color — the Foundation, purple color — a strong layer of soil, yellow color — a weak layer of soil

Сопоставление результатов расчета с результатами расчета на основе аналитического решения показало качественную сходимость, так как в этих расчетах использовались разные реологические модели слабого слоя.

Цветовая шкала на рисунках показывает перемещения относительно оси x от минимальных — синий цвет до максимальных — красный цвет.

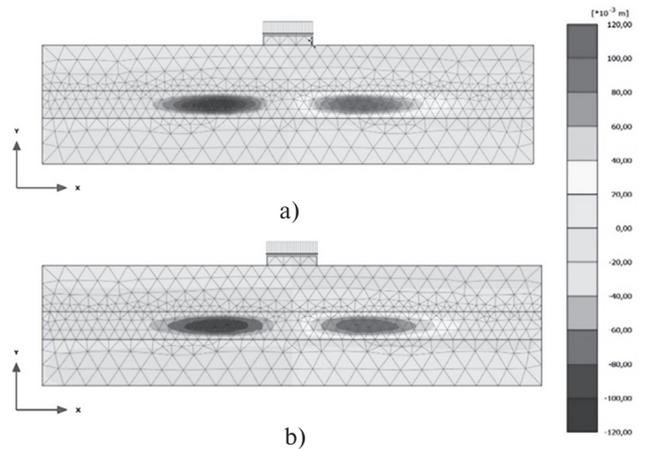


Рис. 7. Изополя горизонтальных перемещений за 300 дней (а) и за 600 дней (б). Обозначения: ярко-зеленый цвет — перемещения в данной области имеют значения от 0 до $20 \cdot 10^{-3}$ м, зеленый цвет — перемещения в данной области имеют значения от 0 до $-20 \cdot 10^{-3}$ м

Fig. 7. Isofield horizontal movements for 300 days (a) and 600 days (b). Designation: bright green — movements in this area have values from 0 to $20 \cdot 10^{-3}$ m, green — movements in this area have values from 0 to $-20 \cdot 10^{-3}$ m

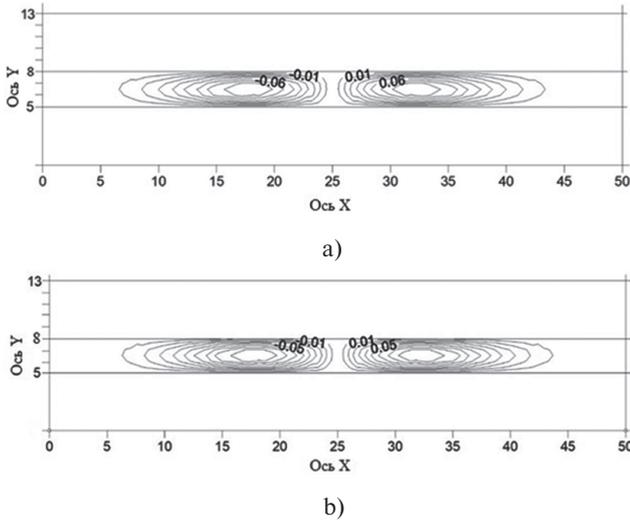


Рис. 8. Изолинии горизонтальных перемещений за 300 дней (а) и за 600 дней (б)
Fig. 8. Horizontal displacement contours in 300 days (a) and 600 days (b)

Основные выводы

1. Задача о выдавливании слабого слоя из сжимаемой толщи основания фундамента является актуальной, так как при строительстве в сложных инженерно-геологических условиях часто возникают такие ситуации и, следова-

тельно, требуется дать качественную оценку возможности или невозможности выдавливания слабого слоя, в том числе осадки и скорости осадки фундамента.

2. Аналитическое решение этой задачи получено с использованием реологической расчетной модели Максвелла, описывающее скорость угловой деформации слабых грунтов от касательных напряжений. Приведены замкнутые формулы для определения скорости выдавливания слабого слоя в зависимости от x и z и от вязкости грунта, а также скорости осадки фундамента.

3. Приведены изолинии скоростей выдавливания слабого слоя, которые симметричны относительно центра ($x = 0$) и имеют экстремум на определенном расстоянии от него и в центре слоя, причем с ростом расстояния от центра скорость выдавливания слоя уменьшается до нуля при $x \rightarrow \infty$.

4. Сравнительная оценка скорости выдавливания слабого слоя, определенная по результатам аналитического и численного (МКЭ) решения, показала их качественную сходимость, что говорит о возможности применения аналитического решения.

Литература

1. Буслов А.С. Уравнения ползучести грунта на основе вероятностной реологической модели [Текст] / А.С. Буслов, Б.В. Бахолдин, Л.Р. Ставницер // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2017. — № 1. — С. 2-8.
2. Киселев Н.Ю. Экспериментальное исследование работы плитного фундамента с демпфирующим слоем на грунтовом основании [Текст] / Н.Ю. Киселев // Геотехника. — 2016. — № 1. — С. 51-60.
3. Надай А. Пластичность и разрушение твердых тел [Текст] / А. Надай. — М.: Мир, 1969.
4. Тер-Мартirosян З.Г. Реологические параметры грунтов и расчеты оснований и сооружений [Текст] / З.Г. Тер-Мартirosян. — М.: Стройиздат, 1990.
5. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов [Текст] / З.Г. Тер-Мартirosян. — М.: АСВ, 2009.
6. Тер-Мартirosян З.Г. Выдавливание слабого слоя из основания фундамента конечной ширины [Текст] / З.Г. Тер-Мартirosян, В.В. Сидоров, А.З. Тер-Мартirosян, А.В. Манукян // Жилищное строительство. — 2016. — № 9. — С. 5-10.
7. Тимошенко С.П. Теория упругости [Текст] / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. — М.: Наука, 1975.
8. Santos J.A., Correa A.G. Reference threshold shear strain of soil application to obtain a unique strain-dependent shear modulus curve for soil. Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. 1, Istanbul, Turkey, 2001, pp. 267-270.
9. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Experimental and theoretical studies of bearing capacity and deformation of reinforced soil foundations under cyclic loading, Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Kyoto, Japan, 2014, pp. 742-747.
10. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Proceedings of the 8th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Sift Ground, Seoul, Korea, 2014, pp. 401-404.

References

1. Buslov A.S., Baholdin B.V., Stavnicer L.R. Uravneniya polzuchesti grunta na osnove veroyatnostnoj reologicheskoy modeli [Soil creep equations based on a probabilistic rheological model]. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov* [Foundations, foundations and soil mechanics]. 2017, I. 1, pp. 2-8.

2. Kiselev N.Yu. Eksperimental'noe issledovanie raboty plitnogo fundamenta s dempfirovuyushchim sloem na gruntovom osnovanii [An experimental study of the work of a slab foundation with a damping layer on a soil base]. *Geotekhnika* [Geotechnics]. 2016, I. 1, pp. 51–60.
3. Nadaj A. *Plastichnost' i razrushenie tverdyh tel* [Plasticity and destruction of solids]. Mir Publ., Moscow, 1969.
4. Ter-Martirosyan Z.G. *Reologicheskie parametry gruntov i raschetny osnovanij i sooruzhenij* [Rheological parameters of soils and calculations of foundations and structures]. Strojizdat Publ., 1990. Moscow.
5. Ter-Martirosyan Z.G. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. ASV Publ., Moscow, 2009.
6. Ter-Martirosyan Z.G., Sidorov V.V., Ter-Martirosyan A.Z., Manukyan A.V. *Vydvazhivanie slabogo sloya iz osnovaniya fundamenta konechnoj shiriny. Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Extruding a weak layer from the base of the foundation of finite width. Housing]. 2016, I. 9, pp. 5–10.
7. Timoshenko S.P., Gul'd'er Dzh. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka Publ., 1975.
8. Santos J.A., Correa A.G., 2001. Reference threshold shear strain of soil application to obtain a unique strain-dependent shear modulus curve for soil. Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, Istanbul, Turkey, 2001, pp. 267–270.
9. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V., 2014. Experimental and theoretical studies of bearing capacity and deformation of reinforced soil foundations under cyclic loading, Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, Kyoto, Japan, 2014, pp. 742–747.
10. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V., 2014. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Proceedings of the 8th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Sift Ground, Seoul, Korea, 2014, pp. 401–404.