

УДК 539.2; 69.04

DOI: 10.25686/2542-114X.2020.1.111

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «КРЕПЬ–МАССИВ ГРУНТА» НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ**В. И. Андреев, В. П. Носырин***Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва)*

Рассмотрена задача цилиндрического отверстия в массиве грунта на большой глубине в слабых обводненных грунтах, т.е. массив можно считать несжимаемым материалом с коэффициентом Пуассона $\nu = 0,5$. Проведен расчет, цель которого – определить влияние функции неоднородности механических характеристик на напряженное состояние системы «крепь – массив грунта». Задача рассматривалась как одномерный случай плоского деформированного состояния. В работе представлены задачи при всех возможных комбинациях трех случаев функций модулей Юнга крепи E^k и четырех случаев модулей упругости массива грунта E^m .

По результатам расчета проведен анализ, на основании которого сделаны следующие выводы: напряженные состояния системы «крепь–массив грунта» практически не зависят от функции модуля Юнга грунта $E^m(r)$, что может быть связано с довольно низкими значениями, которые принимает модуль упругости массива грунта в сравнении с модулем упругости крепи. Функции модуля упругости крепи $E^k(r)$ влияют на напряженное состояние самой крепи и мало влияют на напряженное состояние в массиве грунта. При уменьшении значения $E^k(r)$ на границе отверстия уменьшаются и напряжения. На основании сделанных выводов можно сказать, что при создании неоднородных обделок можно получить случай равнонапряженного или равнопрочного состояния крепи [1, 8], что в свою очередь может привести к существенному экономическому эффекту.

Ключевые слова: неоднородность; подземная полость; плоское деформированное состояние; укрепленное отверстие.

Введение. При создании подземных полостей вблизи отверстия могут изменяться механические характеристики грунта, образующая зону технологического воздействия. Некоторые подобные задачи были рассмотрены в работах [1-3, 5-7]. Изменения механических характеристик в массиве грунта обусловлены появлением трещин, закрытием трещин, спеканием и т.д. и зависят от структуры и типа грунта, а также от способа создания полости.

Для поддержания массива пород устанавливаются различные крепи [2, 4]. В данной работе рассмотрены крепи из торкретбетона с учетом изменения его механических характеристик по радиусу.

Цель работы – исследование влияния функции неоднородности механических ха-

рактеристик на напряженное состояние системы «крепь – массив грунта».

Аналитическое моделирование. Задача рассматривается в упругой постановке. Полагая, что цилиндрическое отверстие большой протяженности находится на большой глубине в слабых обводненных грунтах, т.е. массив можно считать несжимаемым материалом с коэффициентом Пуассона $\nu = 0,5$, принимаем расчетную схему, показанную на рисунке 1. Таким образом, данная задача является одномерным случаем плоского деформированного состояния и рассматривается в полярных координатах.

Принимая во внимание, что изменение механических характеристик обусловлено только функцией модуля упругости $E(r)$, разрешающее уравнение будет иметь следу-

ющий вид [1]:

$$\sigma_r'' + \sigma_r' \left(\frac{3}{r} - \frac{E'(r)}{E(r)} \right) - \frac{\sigma_r}{r} \frac{1-2\nu}{1-\nu} \frac{E'(r)}{E(r)} = 0, \quad (1)$$

где σ_r – нормальное радиальное напряжение. Здесь и далее штрих означает дифференциал по радиусу r .

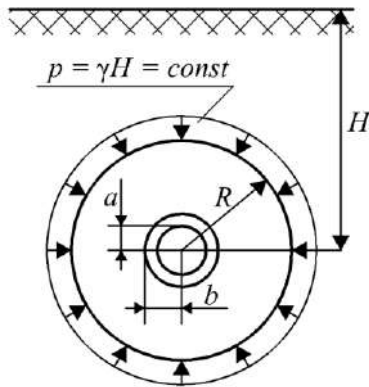


Рисунок 1. Расчетная схема

Решения дифференциального уравнения (1) для крепи и массива грунта имеют вид

$$\sigma_r^k = C_2 + C_1 \int \frac{E(r)}{r^3}; \quad (2)$$

$$\sigma_r^m = C_4 + C_3 \int \frac{E(r)}{r^3}, \quad (3)$$

где $C_1 \dots C_4$ – константы интегрирования.

Функции модуля упругости $E(r)$ крепи и массива грунта изменяются по следующим законам [3]:

$$E^k(r) = E_0^k \left(\frac{r}{a} \right)^\delta; \quad (4)$$

$$E^m(r) = E_0^m \left[1 + \left(\frac{E_1^m}{E_0^m} - 1 \right) \left(\frac{b}{r} \right)^m \right], \quad (5)$$

где E_0^k – модуль упругости крепи вблизи контура полости ($r = a$); E_0^m – модуль упругости ненарушенного (природного) массива;

E_1^m – модуль упругости массива грунта вблизи контакта с обделкой ($r = b$), δ и m – эмпирические коэффициенты.

Константы интегрирования $C_1 \dots C_4$, входящие в уравнения (2) и (3), определяются из следующих граничных условий:

$$\begin{aligned} r = a, \quad \sigma_r^k &= 0; \\ r = b, \quad \sigma_r^k &= \sigma_r^m; u^k = u^m; \\ r = R, \quad \sigma_r^m &= -\gamma H, \end{aligned} \quad (6)$$

где γ – удельный вес грунта; H – глубина заложения отверстия.

Функции перемещений $u(r)$, значения которых входят в граничные условия (6) при $r = b$, имеют следующий вид:

$$u(r) = \frac{r}{E(r)} (1+\nu) \left[\sigma_r (1-2\nu) + \sigma_r' r (1-\nu) \right]. \quad (7)$$

После решения описанной выше краевой задачи находят значения нормального тангенциального напряжения σ_θ из следующего равенства, полученного из дифференциального уравнения равновесия в полярных координатах:

$$\sigma_\theta = r\sigma_r' + \sigma_r. \quad (8)$$

В данной работе было рассмотрено 12 вариантов задачи со следующими исходными данными: $a = 3$ м; $b = 3,4$ м; $R = 30$ м; $H = 200$ м; $\nu^k = 0,2$; $E_0^k = 3,7 \cdot 10^4$ МПа; $E_0^{k1} = 32650$ МПа; $\delta_1 = 1$; $E_0^{k2} = 25400$ МПа; $\delta_2 = 3$; $E_0^m = 45$ МПа; $E_1^m = 35$ МПа; $m_1 = 2,5$; $m_2 = 4$; $m_3 = 8$.

Номера задач и функции модулей упругости приведены в таблице. В данной работе были рассмотрены задачи при всех возможных комбинациях трех случаев функций модулей Юнга крепи E^k и четырех случаев модулей упругости массива грунта E^m . Функции E^k и E^m приведены на рисунке 2. Результаты расчетов представлены на рисунках 3-4.

Номера задач и функции модулей упругости

Грунт\Крепь	$E_1^k = E_0^k = \text{const}$	$E_2^k(r) = E_0^{k1} \left(\frac{r}{a}\right)^{\delta_1}$	$E_3^k(r) = E_0^{k2} \left(\frac{r}{a}\right)^{\delta_2}$
$E_1^m = E_0^m = \text{const}$	11	12	13
$E_2^m(r) = E_0^m \left[1 + \left(\frac{E_1^m}{E_0^m} - 1 \right) \left(\frac{b}{r} \right)^{m_1} \right]$	21	22	23
$E_3^m(r) = E_0^m \left[1 + \left(\frac{E_1^m}{E_0^m} - 1 \right) \left(\frac{b}{r} \right)^{m_2} \right]$	31	32	33
$E_4^m(r) = E_0^m \left[1 + \left(\frac{E_1^m}{E_0^m} - 1 \right) \left(\frac{b}{r} \right)^{m_3} \right]$	41	42	43

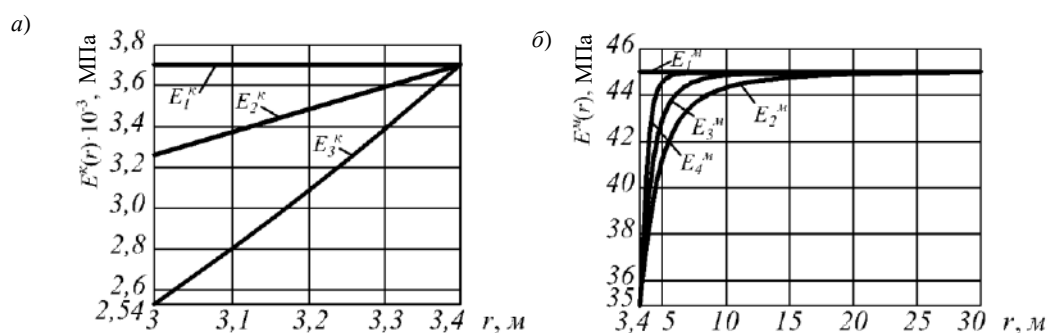


Рисунок 2. Функции модулей упругости: а – крепи; б – массива грунта

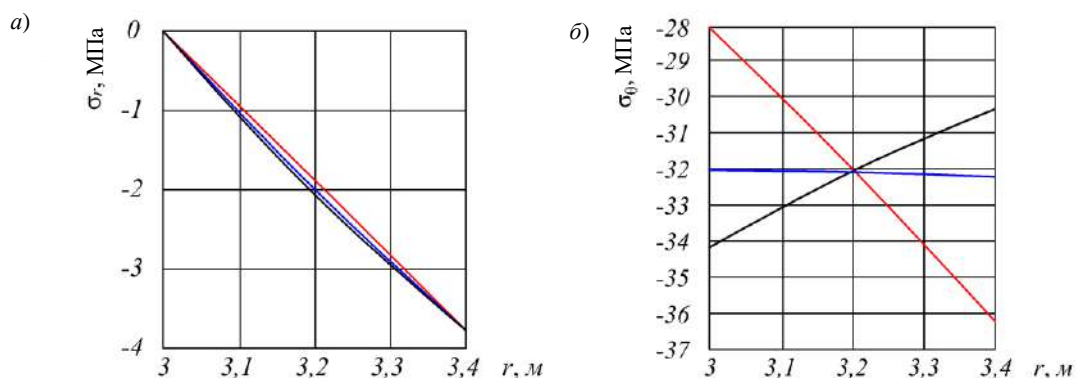


Рисунок 3. Функции нормальных напряжений в крепи:

а – радиальные напряжения σ_r ; б – тангенциальные напряжения σ_θ .

- задачи № 11 – 41,
- задачи № 12 – 42,
- задачи № 13 – 43

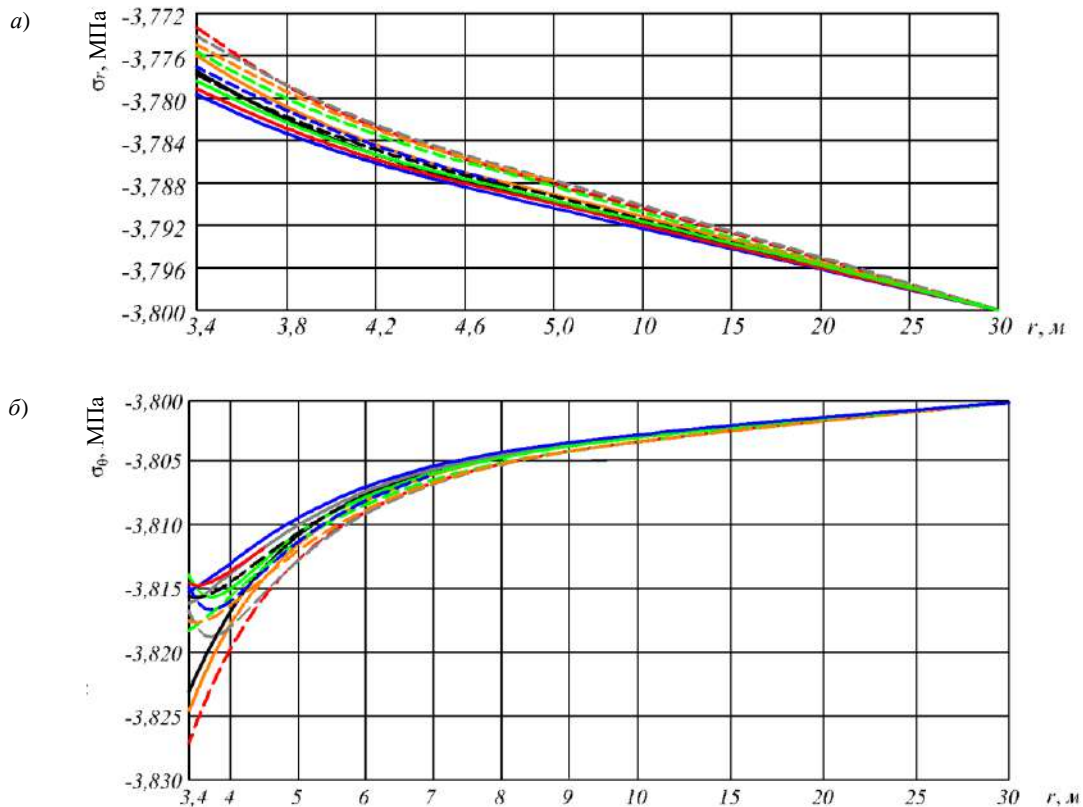


Рисунок 4. Функции нормальных напряжений в массиве грунта:

a – радиальные напряжения σ_r ; *б* – тангенциальные напряжения σ_θ ,

— задача № 11,	— задача № 32,
— задача № 21,	— задача № 42,
— задача № 31,	— задача № 13,
— задача № 41,	— задача № 23,
— задача № 12,	— задача № 33,
— задача № 22,	— задача № 43

Выводы. Анализируя напряженные состояния представленных задач, можно сделать вывод, что напряженные состояния системы «крепь – массив грунта» практически не зависят от функции модуля Юнга грунта $E^m(r)$. Это может быть связано с довольно низкими значениями, которые принимает модуль упругости массива грунта, в сравнении с модулем упругости крепи.

Также стоит отметить, что функции модуля упругости крепи $E^k(r)$ влияют на напряженное состояние самой крепи и мало влияют на напряженное состояние в массиве грунта. При уменьшении значения $E^k(r)$ на границе отверстия уменьшаются и напряжения. Таким образом можно получить равнонапряжённое или равнопрочное состояние крепи [1, 8], что в свою очередь может привести к существенному экономическому эффекту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел. Москва: АСВ, 2002. 288 с.
2. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. Москва: Недра, 1984. 324 с.
3. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. Москва: Недра, 1975. 296 с.
4. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Недра, 1994. 382 с.

5. Гоцев Д.В., Свиридова Е.Н. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния упругого массива вблизи сферической полости с учетом технологической неоднородности его механических свойств // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5139.

6. Нгуен З.Ф. Геомеханическое обоснование конструкции крепи тоннелей метрополитенов в неустойчивых породах при щитовом способе проходки: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016.

7. Исследование расчета многослойной крепи тоннелей, сооружаемых в технологически неоднородном массиве пород / А.Н. Панкратенко, З.Ф. Нгуен, А.С. Саммаль, С.М. Нгуен // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S13. С. 3-12.

8. Andreev V.I., Barmenkova E.V., Potekhin I.A. Way of Optimization of Stress State of Elements of Concrete Structures // Procedia engineering. 2016. No. 153. Pp. 37-44.

Информация об авторах

АНДРЕЕВ Владимир Игоревич – профессор, доктор технических наук, действительный член Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), заслуженный работник высшей школы РФ, член Национального Российского комитета по теоретической и прикладной механике РАН, почетный профессор Варшавского политехнического университета, Киргизского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры, Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, почетный строитель России, Москва. Область научных интересов – механика неоднородных тел.

НОСЫРИН Владислав Павлович – преподаватель кафедры сопротивления материалов, Московский государственный строительный университет, Москва. Область научных интересов – механика неоднородных тел. Автор 5 работ. E-mail: vlad.nosyrin.94@mail.ru.

UDC 539.2; 69.04

DOI: 10.25686/2542-114X.2020.1.111

DISCONTINUITY OF MECHANICAL CHARACTERISTICS IN "SUPPORT-SOIL MASSIF" SYSTEM AND ITS INFLUENCE ON THE STRESS CONDITION

V. I. Andreev, V. P. Nosyrin

Moscow State University of Civil Engineering (Moscow)

The paper analyses the problem of a cylindrical hole in the soil massif at a great depth, in weak flooded soils. The soil massif can be considered an incompressible material with a Poisson's ratio $\nu = 0,5$. The calculation was carried out in order to determine the influence of heterogeneity of mechanical characteristics on the stress condition of the "support-soil massif" system. The problem was considered as a one-dimensional case of a plane deformed state. In this work, we considered the problems for all possible combinations of the three cases of Young's support modulus functions E^k and four cases of elastic module of the soil massif E^m .

The authors analyzed the results of calculation and drew the following conclusions: the stress condition of support - soil massif system is practically independent on the function of Young's modulus of soil $E^m(r)$, which may be due to rather low values that the modulus of elasticity of soil massif assumes, in comparison with the modulus of elasticity of the support. The functions of support strength modulus $E^k(r)$ affect the stress state of the lining itself and have little effect on the stress state in the soil massif. When decreasing $E^k(r)$ at the hole boundary, stresses also decrease. Based on the conclusions made, it can be argued that when creating inhomogeneous supports it is possible to obtain equally stressed or equally strong supports [1, 8], which, in turn, can result in significant cost advantage.

Keywords: inhomogeneous; underground cavity; flat deformed state; reinforced hole.

REFERENCES

1. Andreev V.I. Nekotorye zadachi i metody mehaniky neodnorodnyh tel [Problems and methods of mechanics of heterogeneous elements], Moscow: ASV, 2002, 288 p.
2. Baklashov I.V., Kartoziya B.A. Mehanika podzemnyh sooruzheniy i konstrukciy krepey [Mechanics of underground structures and structures of supports], Moscow: Nedra, 1984, 324 p.
3. Baklashov I.V., Kartoziya B.A. Mehanika gornyh porod [Rock mechanics], Moscow: Nedra, 1975, 296 p.
4. Bulychev N.S. Mehanika podzemnyh sooruzheniy [Mechanics of underground structures]: textbook for universities, second edition, revised and supplemented, Moscow: Nedra, 1994, 382 p.
5. Gotsev D.V., Sveridova E.N. Matematicheskoye modelirovanie napryazheno-deformirovannogo sostoyaniya uprugogo massiva vblizy sfericheskoy polosty s uchetom technologicheskoy neodnorodnosti ego mechanicheskoyh svoystv [Mathematical modeling of the stress-strain state of an elastic array near a spherical cavity, taking into account its technologically heterogeneous mechanical properties], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Herald of Don], 2018, No. 3. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5139.
6. Nguyen Z.F. Geomahanicheskoye obosnovaniye konstrukciy krepy tonneley metropolitenov v neustoychivyyh porodah pri shitovom sposobe prohodki [Geomechanical substantiation of the construction of the lining of subway tunnels in unstable rocks with the shield method]: PhD thesis, Moscow, 2016.
7. Pankratenko A.N., Nguyen Z.F., Sammal A.S., Nguyen S.M. Issledovaniye rascheta mnogosloynnoy krepi tonneley, sooruzhaemyh v technologicheskoy neodnorodnom massive [Research calculation multilayer lining tunnels, build in technologically heterogeneous massif rock], *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)* [Mountain News and Analysis Bulletin (scientific and technical journal)], 2016, No. S13, pp. 3-12.
8. Andreev V.I., Barmenkova E.V., Potekhin I.A. Way of Optimization of Stress State of Elements of Concrete Structures, *Procedia engineering*, 2016, No. 153, pp. 37-44.

Information about authors

ANDREEV Vladimir Igorevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Strength, Moscow State University of Civil Engineering, Honorary worker of the Russian Higher Education, Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), member of the National Russian committee for theoretical and applied mechanics of the Russian Academy of Sciences, Professor Emeritus of the Warsaw University of Technology, Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture n.a. N. Isanov, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Honorary builder of Russia, Moscow. Research interests – mechanics of heterogeneous elements.

NOSYRIN Vladislav Pavlovich – Lecturer of the Department of Materials Strength, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. Research interests – mechanics of heterogeneous elements. Author of 5 articles. E-mail: vlad.nosyrin.94@mail.ru.

Библиографическая ссылка

Андреев В.И., Носырин В.П. Влияние неоднородности механических характеристик системы «крепь–массив грунта» на напряженное состояние // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2020. – № 1(13). – С. 111-116. – DOI: 10.25686/2542-114X.2020.1.111