

А.В. Алексеев

ДЕФОРМАЦИИ ЛБА ЗАБОЯ ПРИ ПРОХОДКЕ ТОННЕЛЯ В ЗОНЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Аннотация. В практике описания деформирования грунтового массива под нагрузкой существует ряд моделей, параметры которых удовлетворяют некому идеализированному состоянию среды. Идеализирование среды вводит ряд допущений и определяет границы применимости соответствующих моделей. В зависимости от стоящих задач принято использовать расчетные модели грунта разной сложности, ограничения и допущения которых в меньшей степени влияют на результат расчета реальной среды. Для описания грунтового массива используют различные модели, описывающие поведение материала под нагрузкой, но большинство моделей не учитывают анизотропию прочностных и деформационных свойств. Автором была дана оценка влияния анизотропии деформационных свойств массива, включающего структурно-механическую неоднородность на напряженно-деформированное состояние в призабойной зоне сооружаемого тоннеля. Приведены результаты сравнения деформирования поверхности проходческого забоя при приближении к структурно-механической неоднородности для двух геомеханических моделей грунтового массива: изотропного и трансверсально-изотропного. Оценено влияние учета структурно-механической неоднородности на деформацию поверхности забоя.

Ключевые слова: изотропный массив, структурно-механическая неоднородность, трансверсально-анизотропный массив, устойчивость проходческого забоя, слоистый массив, численное моделирование, метод конечных элементов.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-48-56

Литературный обзор

В целях обеспечения устойчивости породных обнажений и соблюдения технического регламента о промышленной безопасности, в качестве временной крепи кровли и лба забоя, по мере его разработки, должны применяться разные способы повышения устойчивости. Выбор способа, как правило, осуществляется по методу аналогий, а нагрузка на крепление рассчитывается по схеме заданных деформаций или заданных нагрузок. Документом, рекомендующим выбор способа, является «Методические рекомендации по расчету временной крепи тоннельных выработок» [9], в со-

ответствии с которым, для обеспечения устойчивости необходимо соблюдение условия прочности, сформулированного из предположения о плоской жестко-пластической модели деформирования грунтового массива вдоль оси тоннеля. Недостатком данной модели является невозможность рассчитать нагрузки на временное крепление лба забоя методом заданных деформаций призабойного пространства. Вместе с этим, современные представления об устойчивости проходческого забоя, особенно в случае учета технологии возведения сооружения, основываются на объемных моделях, учитывающих упругие и

пластические деформации в объемно напряженно-деформированном состоянии массива [1–7, 12].

В данной статье модель transversально изотропной среды рассматривается с некоторым допущением, основанным на том, что сооружение тоннеля провоцирует в призабойной зоне разгрузку массива от естественного напряженного состояния, что в свою очередь, не позволяет достоверно оценить численную величину деформаций, т.к. условием применимости упругих моделей является однократное нагружение или разгрузка.

Задача о геомеханическом состоянии массива около выработки и структурно-механического нарушения уже обсуждалась в работах [13–15], где это нарушение представлено узким прямоугольным отверстием, а граничные условия на его контуре приняты в соответствии с законом сухого трения Кулона. Авторы работы убедительно доказали, что влияние неоднородности тем больше, чем больше отличаются друг от друга коэффициенты Пуассона нарушения и среды.

Вместе с этим, исследования, проведенные в Горном университете, показывают значительную анизотропию деформационных свойств аргилитоподобных глин (рис. 1). Так, коэффициент ани-

тропии деформационных свойств, выраженный через отношение модуля деформации параллельно слоистости к модулю деформации перпендикулярно слоистости, составляет 2,05 [8, 10]. При этом значительно отличаются и коэффициенты Пуассона для образцов, подвергшихся испытанию на одноосное сжатие параллельно и перпендикулярно слоистости.

Сетка конечных элементов и модель

Исследования процессов деформирования и разрушения породного массива в приконтурной области традиционно выполняется в рамках механики сплошной среды, когда обеспечивается непрерывность деформаций. В отличие от описанного ранее подхода к моделированию неоднородности, в данной статье структурно-механическая неоднородность представляет собой узкую прямолинейную область с заполнителем, имеющим отличные механические свойства, находящимся в пластическом состоянии и неразрывно связанную с массивом. Такой способ моделирования избавит от необходимости задавать контактное взаимодействие между однородным массивом и неоднородностью.

На рис. 2 приведена расчетная схема модели. Ширина кольца обделки приня-

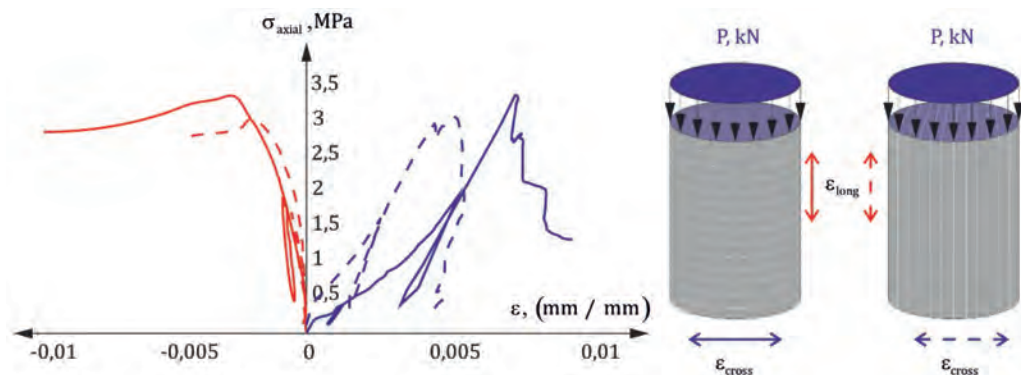


Рис. 1. Графики зависимости напряжений от деформаций аргилитоподобных глин

Fig. 1. Stress-strain curves for argillite-like clay

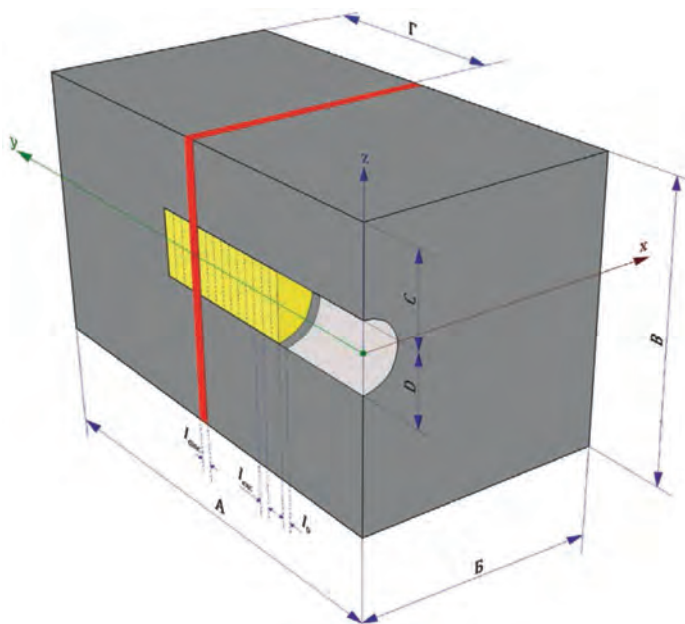


Рис. 2. Расчетная схема
Fig. 2. Analytical model

та 1 м. Отставание крепи от забоя равно ширине одного кольца обделки. Диаметр тоннеля равен 8 м. Ширина модели равна 3 диаметрам. В целях уменьшения влияния граничных условий, поверхность забоя совпадает с поверхностью неоднородности через 11 заходок. Модель массива с параметрами, представленными в таблице, находилась под действием гравитации. Пластические свойства нарушения задавались исходя из одноос-

ных испытаний на сжатие протерозойских глин [10].

Для моделирования была выбрана структурированная стека конечных элементов (рис. 3, а). Сетка имела сгущение в зоне нарушения. В модели были использованы два типа конечных элементов: редуцированные трехмерные восьмиузловые C3D8R элементы, используемые для грунтового массива, а также четырехузловые поверхностные элемен-

Параметры модели
Parameters of the model

		Объемный вес γ , МН/м ³	Коэффициент Пуассона			Модуль общих деформаций		
			ν_{vh}	ν_{hv}	ν_{hh}	E_0 , МПа	$E_{ }$, МПа	E_{\perp} , МПа
Изотропный	однородный ненарушенный массив	0,0235	0,28	—	—	280	—	—
	нарушение	0,0200	0,28	—	—	50	—	—
Трансверсально-изотропный	однородный ненарушенный массив	0,0235	0,28	0,17	0,065	—	470	280
	нарушение	0,0200	0,28	0,14	0,025	—	100	50

ты S4R (рис. 3, б), используемые для моделирования обделки. Оба элемента для расчета матрицы жесткости используют одну точку интегрирования, а результат интегрирования интерполируется на узловые точки. Однородный массив представлен слоистой средой (рис. 3, в).

Матрица жесткости изотропной упругой среды описывается двумя независимыми параметрами: коэффициентом Пуассона и модулем упругости. В расчетах грунтового массива, вместо модуля упругости часто используют модуль общих деформаций. В дальнейшем будем использовать именно его. Сама матрица имеет вид (1).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

где ε_{nn} — деформации по оси n ; γ_{nm} — деформации сдвига; σ_{nm} — нормальные напряжения; E — модуль общих деформаций; ν — коэффициент Пуассона.

Матрица жесткости трансверсально-изотропной упругой среды описана уравнением (2). Так, недостатком данной модели является большое количество параметров, необходимых для расчета, в общем случае это 7 независимых констант.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{\perp}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

где элементы матрицы можно выразить как:

$$a_{11} = \frac{E (E \nu_{vh}^2 - E_{\perp})}{(E_{\perp} \nu_{hh} - E_{\perp} + 2E \nu_{hh}^2)(1 + \nu_{hh})};$$

$$a_{12} = -\frac{E (E \nu_{vh}^2 + E_{\perp} \nu_{hh})}{(E_{\perp} \nu_{hh} - E_{\perp} + 2E \nu_{hh}^2)(1 + \nu_{hh})};$$

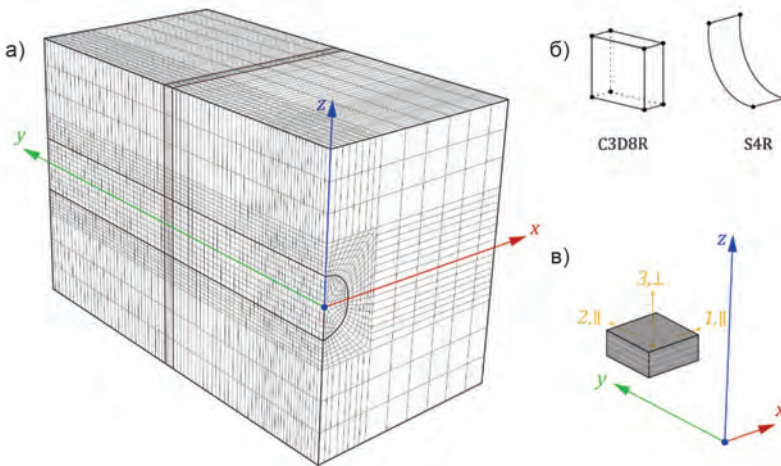


Рис. 3. Сетка конечных элементов (а); типы элементов (б); направление ортотропии материала (в)
Fig. 3. Finite element mesh (a); types of elements (b); orientation of the material orthotropy (c)

$$a_{13} = \frac{E E_{\perp} v_{vh}}{E_{\perp} v_{hh} - E_{\perp} + 2E v_{hh}^2};$$

$$a_{21} = -\frac{E (E_{\perp} v_{hh} + v_{hh}^2 E)}{(E v_{hh} - E_{\perp} + 2E v_{vh}^2)(1 + v_{hh})};$$

$$a_{22} = \frac{E (-E_{\perp} + v_{vh}^2 E)}{(E_{\perp} v_{hh} - E_{\perp} + 2E v_{vh}^2)(1 + v_{hh})};$$

$$a_{23} = -\frac{E E_{\perp} v_{vh}}{E_{\perp} v_{hh} - E_{\perp} + 2E v_{vh}^2};$$

$$a_{31} = -\frac{E E_{\perp} v_{vh}}{E_{\perp} v_{hh} - E_{\perp} + 2E v_{vh}^2};$$

$$a_{32} = -\frac{E E_{\perp} v_{vh}}{E_{\perp} v_{hh} - E_{\perp} + 2E v_{vh}^2};$$

$$a_{33} = \frac{(v_{hh} - 1) E_{\perp}^2}{E_{\perp} v_{hh} - E_{\perp} + 2E v_{vh}^2};$$

$$G = \frac{E}{2(1 + v_{hh})};$$

$$G_{\perp} \leq \frac{E_{\perp}}{2(1 + v_{vh})}.$$

где v_{vh} — коэффициент поперечных деформаций, характеризующий горизонтальные деформации, вызванные продольными напряжениями; v_{hh} — коэффициент поперечной деформации, характеризующий горизонтальные деформации, вызванные горизонтальными напряжениями; E_{\perp} — модуль деформации в направлении перпендикулярно слоистости; E_{\parallel} — модуль деформации в направлении параллельно слоистости; G_{\perp} — модуль сдвига в вертикальной плоскости (перпендикулярно плоскости изотропии); G_{\parallel} — модуль сдвига в горизонтальной плоскости (в плоскости изотропии).

Особым подклассом ортотропии является поперечная изотропия, которая характеризуется плоскостью изотропии в каждой точке материала. Предполагается, что плоскость 1–2 является пло-

скостью изотропии (рис. 3, в) и в каждой точке плоскости $E_1 = E_2 = E_{\parallel}$, $v_{31} = v_{32} = v_{hv}$, $v_{13} = v_{23} = v_{vh}$ и $G_{13} = G_{23} = G_{\perp}$ где \parallel и \perp означают «параллельно» и «перпендикулярно плоскости», соответственно. В общем, для обеспечения симметричности матрицы жесткости должно выполняться условие термодинамического равновесия, так величины v_{hv} и v_{vh} не равны, и связаны соотношением $v_{hv}/E_{\perp} = v_{vh}/E_{\parallel}$.

Обсуждение

Проанализировав характер деформирования, можно сказать, что в изотропном массиве, на удалении от нарушения равном диаметру тоннеля (рис. 4, 1) абсолютные деформации лба забоя вдоль оси тоннеля превосходят деформации в трансверсально-изотропном массиве в 2,45 раза. Наглядная картина формирования деформаций представлена на рис. 4.

При приближении забоя к нарушению на расстояние, равное $0,375D$ (рис. 4, 2) отношение деформаций продолжает увеличиваться. Сокращение расстояния от лба забоя тоннеля до нарушения до величины $0,125D$ (рис. 4, 3) провоцирует деформации, соотносящиеся между собой в соотношении 2,68, а также значительный рост пластических деформаций.

Кроме того, перейдя от полярной системы координат к декартовой, в осях θz и сопоставив значения напряжений с условием прочности жесткопластической модели [11]

$$(\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2 =$$

$$= \sin^2 \sin^2 \varphi (\sigma_{\theta} + \sigma_z + 2C \cot \cot \varphi)^2 \quad (3)$$

наблюдается состояние, в соответствии с которым, следуя [9] необходимо предусмотреть временное крепление лба забоя начиная с расстояния от нарушения, равного D .

Так, разработанная модель геомеханического состояния массива горных

пород с деформационной анизотропией, вмещающая выработку и нарушение, показывает, что расположенное в непосредственной близости от выработки нарушение оказывает существенное влияние на распределение деформаций

в окружающем массиве как изотропном, так и анизотропном. Деформации анизотропного массива, учитывающего различие деформационных свойств массива, показывают меньшие значения, чем изотропного.

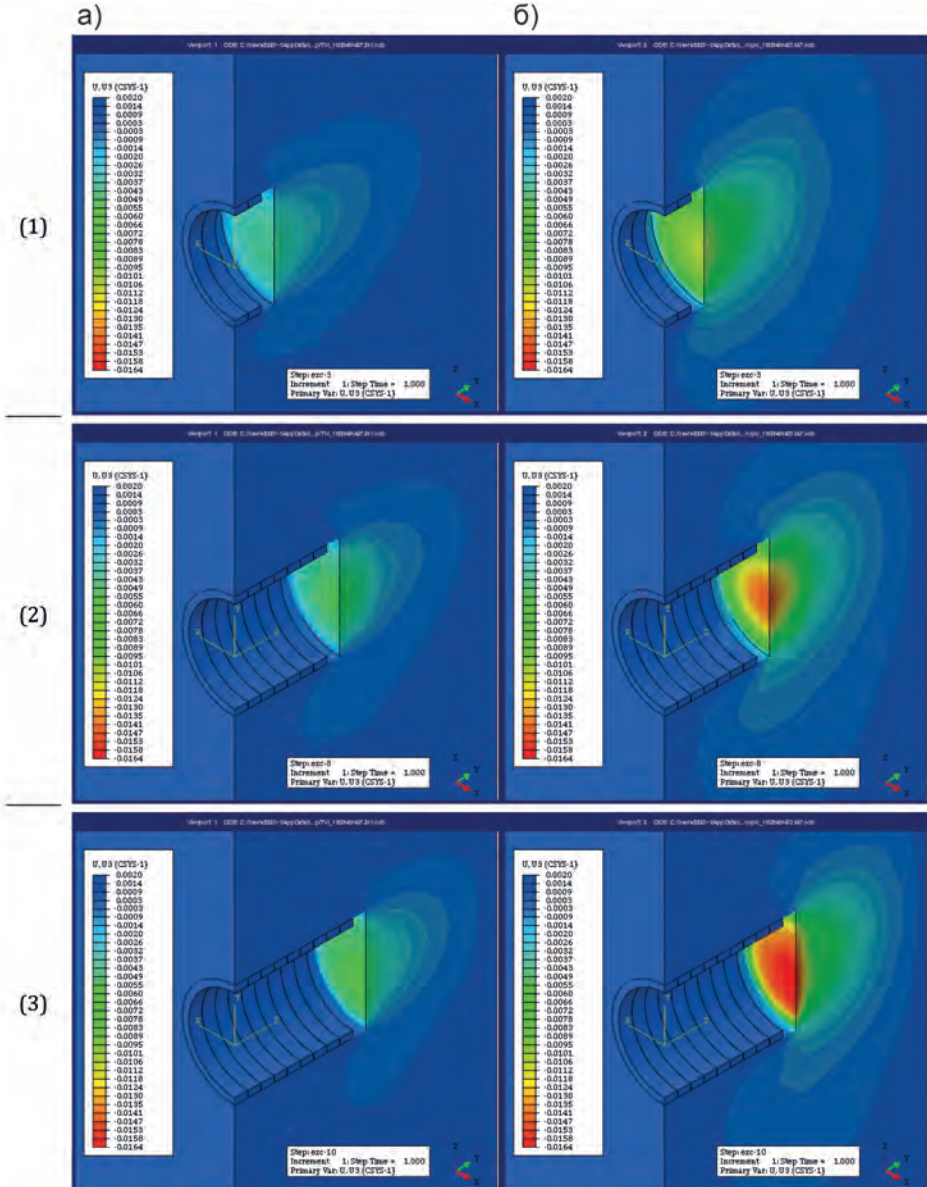


Рис. 4. Трансверсально-изотропная модель (а); изотропная модель (б); (1) – расстояние до нарушения D; (2) – расстояние до нарушения 0,375D; (3) – расстояние до нарушения 0,125D

Fig. 4. Transversely isotropic mode (a); isotropic model (b); distance to dislocation D (1); distance to dislocation 0,375D (2); distance to dislocation 0,125D (3)

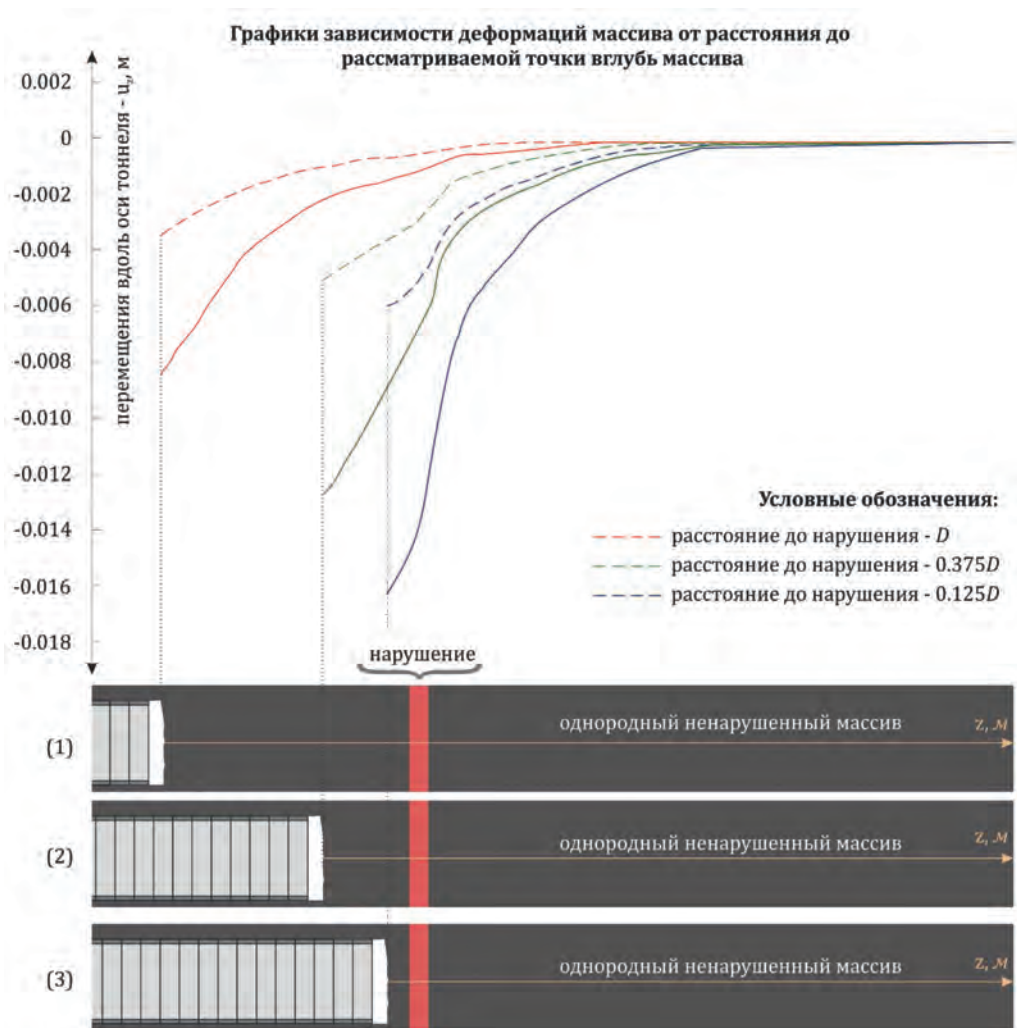


Рис. 5. График зависимости деформаций массива от расстояния до рассматриваемой точки в массиве. Сплошной линией обозначены деформации изотропного массива, пунктирной — трансверсально-изотропного массива

Fig. 5. Deformation versus distance to a control point in mass. Solid line is strains in the isotropic mass; dashed line is strains in transversely isotropic mass

Выводы

Характер распределения деформаций поверхности забоя, находящегося в зоне нарушения и ненарушенном массиве различен. Зона влияния нарушения в обоих случаях оказалась равна диаметру тоннеля.

Учет в модели свойств заполнителя структурно-механической неоднородно-

сти, расширяет возможности модели в оценке и анализе состояния анизотропного массива.

Учет анизотропии упругих и прочностных свойств массива поможет достовернее прогнозировать положение поверхности ослабления в глинистых массивах, по которой может произойти какое-либо нарушение сплошности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anagnostou G., Schuerch R.* Tunnel face stability and tunnelling induced settlements under transient conditions. 2016.
2. *Graziani A.* Face stability control for EPB tunnels in a non homogeneous till formation with highly permeable layers // *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground.* 2012, pp. 387–394.
3. *Hisatake M.* Effects of the ring-cut excavation method on the restraint of displacements ahead of a tunnel face // *Tunnelling and Underground Space Technology.* 2009.
4. *Hisatake M.* Continuous field based upper bound analysis for three-dimensional tunnel face stability in undrained clay // *Computers and Geotechnics.* 2018. No June (94), pp. 207–213.
5. *Wang C.* Study on stability of full clay excavation face in boring of slurry shield // *Tunnel construction.* 2015. No 7 (35), pp. 642–649.
6. *Zhang C., Han K., Zhang D.* Face stability analysis of shallow circular tunnels in cohesive-frictional soils // *Tunnelling and Underground Space Technology.* 2015. (50), pp. 345–357.
7. *Булычев Н. С.* Теория расчета подземных сооружений. — СПб., 1997. — 9–11 с.
8. *Карасев М. А.* Прогноз геомеханических процессов в слоистых породных массивах при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации в условиях плотной городской застройки. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2017.
9. *Меркин В. Е., Колин Д. И., Сарabeeв В. Ф., Старчевская Л. Л., Хазанов С. Ю.* Методические рекомендации по расчету временной крепи тоннельных выработок. — М.: Министерство транспортного строительства СССР, 1984.
10. *Протосеня А. Г. и др.* Определение физико-механических свойств протерозойских глин для выполнения геотехнических расчетов при разработке рабочей документации по объекту: «Строительство Фрунзенского радиуса за станцию «Международная» до станции «Южная», включая проектирование. — СПб., 2015.
11. *Соколовский В. В.* Теория пластичности. — М.: Высшая школа, 1969. — 608 с.
12. *Супрун И. К.* Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния грунтового массива при проходке тоннелей технологией с пригрузом забоя // *Записки Горного института.* — 2012. — № 196. — С. 94–100.
13. *Черданцев Н. В.* Геомеханическое состояние массива горных пород вокруг выработки и геологического нарушения // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2015. — № 12. — С. 52–58.
14. *Черданцев Н. В.* Исследование состояния анизотропного массива горных пород в окрестности выработки, пройденной вблизи дизъюнктивного нарушения // *Промышленная безопасность и геомеханика.* — 2017. — № 2. — С. 34–40.
15. *Черданцев Н. В., Черданцев С. В.* Геомеханическое состояние массива горных пород, вмещающего выработку и дизъюнктивное нарушение // *Вестник КузГТУ.* — 2014. — № 6. — С. 3–12. **П/АБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Алексеев Александр Васильевич — аспирант, e-mail: a1exeev@yandex.ru, Санкт-Петербургский горный университет.

ISSN 0236-1493. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'.* 2018. No. 12, pp. 48–56.

Face deformation in tunneling in the zone of structural and mechanical heterogeneity

Alekseev A.V., Graduate Student, e-mail: a1exeev@yandex.ru, Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Abstract. Engineering practice has a number of idealized model representations to describe deformation of soil. In the meanwhile, an idealized representation involves a series of assumptions and limited ranges of applicability. For this reason, depending on a problem, an engineer should use simulation mo-

dels with the constraints and assumptions such that to have lesser influence on the calculation data for a real medium. At the present date, there are many different models available for the description of the behavior of soil under loading. The common disadvantage of the most models is neglecting anisotropy of strength and deformation characteristics of materials. The aim of this study is to assess the influence exerted by the anisotropy of deformation of a soil mass with a structural and mechanical heterogeneity on the stress state in the face area of a tunnel. The geomechanical model results on deformation of the tunnel face when approaching the structural and mechanical heterogeneity in the isotropic and transversely isotropic soil masses are compared. The influence of the structural and mechanical heterogeneity on the face front deformation is assessed.

Key words: Isotropic soil mass, structural and mechanical heterogeneity, transversely anisotropic mass, tunnel face stability, stratified mass, numerical modeling, finite element method.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-48-56

REFERENCES

1. Anagnostou G., Schuerch R. *Tunnel face stability and tunnelling induced settlements under transient conditions*. 2016.
2. Graziani A. Face stability control for EPB tunnels in a non homogeneous till formation with highly permeable layers. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. 2012, pp. 387–394.
3. Hisatake M. Effects of the ring-cut excavation method on the restraint of displacements ahead of a tunnel face. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2009.
4. Hisatake M. Continuous field based upper bound analysis for three-dimensional tunnel face stability in undrained clay. *Computers and Geotechnics*. 2018. No June (94), pp. 207–213.
5. Wang C. Study on stability of full clay excavation face in boring of slurry shield. *Tunnel construction*. 2015. No 7 (35), pp. 642–649.
6. Zhang C., Han K., Zhang D. Face stability analysis of shallow circular tunnels in cohesive-frictional soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. (50), pp. 345–357.
7. Bulychev N.S. *Teoriya rascheta podzemnykh sooruzheniy* [Theory for calculation of underground structures], Saint-Petersburg, 1997, 9–11 p.
8. Karasev M.A. Prognoz geomekhanicheskikh protsessov v sloistyykh porodnykh massivakh pri stroitel'stve podzemnykh sooruzheniy slozhnoy prostranstvennoy konfiguratsii v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki [Prediction of geomechanical processes in layered rock mass under complex configuration underground construction in conditions of compact urban development], Doctor's thesis, Saint-Petersburg, Izd-vo SPbGU, 2017.
9. Merkin V.E., Kolin D.I., Sarabeev V.F., Starchevskaya L.L., Khazanov S.Yu. *Metodicheskie rekomendatsii po raschetu vremennoy krepki tonnel'nykh vyrabotok* [Guidelines on temporal ground support design in tunnels], Moscow, Ministerstvo transportnogo stroitel'stva SSSR, 1984.
10. Protosenya A.G. *Opreделение физико-механических свойств протерозойских глин для выполнения геотехнических расчетов при разработке рудоочной документации по объекту: «Строительство Фрунзенского радиуса за станицей «Международная» до станицы «Южная», включая проектирование* [Determination of physical and mechanical properties of Proterozoic soil in engineering design in preparation of project paperwork for: Construction of the Frunze ray from Mezhdunarodnaya to Yuzhnaya Stations, including design and planning], Saint-Petersburg, 2015.
11. Sokolovskiy V.V. *Teoriya plastichnosti* [Theory of plasticity], Moscow, Vysshaya shkola, 1969, 608 p.
12. Suprun I. K. Prognoz prostranstvennogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntovogo massiva pri prokhodke tonneley tekhnologiy s prigruzom zaboya [Prediction of three-dimensional stress state in soil under tunneling with additional loading on face], *Zapiski Gornogo instituta*. 2012, no 196, pp. 94–100.
13. Cherdantsev N.V. Geomekhanicheskoe sostoyanie massiva gornykh porod vokrug vyrabotki i geologicheskogo narusheniya [Geomechanical behavior of rock mass around an underground excavation and geological discontinuity], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 12, pp. 52–58. [In Russ].
14. Cherdantsev N.V. Issledovanie sostoyaniya anizotropnogo massiva gornykh porod v okrestnosti vyrabotki, proydennoy vblizi diz'yunktivnogo narusheniya [Analysis of state of an anisotropic rock mass around an excavation nearby a disjunction], *Promyshlennaya bezopasnost' i geomekhanika*. 2017, no 2, pp. 34–40. [In Russ].
15. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Geomekhanicheskoe sostoyanie massiva gornykh porod, vmeshchayushchego vyrabotku i diz'yunktivnoe narushenie [Geomechanical behavior of rock mass enclosing an excavation and a disjunction], *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014, no 6, pp. 3–12. [In Russ].