

Моделирование смещений грунтового контура подземных сооружений

С.Г. Страданченко, М.Д. Молев, В.А. Дмитриенко

*Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал)
Донского государственного технического университета, Шахты*

Аннотация: Приведены результаты исследования влияния упрочнения свода выработок небольшой длины, произвольной формы, с поперечным сечением до 80 м^2 , с опережающим анкерованием, что позволяет значительно снизить смещения грунтовых обнажений. Анализ показывает, что полностью исключить вывалы грунта не удаётся, поэтому выполнен комплекс исследований напряженно-деформированного грунтового массива, упрочнённого защитным экраном. Моделированием методом конечных элементов установлена неэффективная работа опережающего анкерования длиной до 15 м, поскольку анкера расположены в зоне сползания грунта. Увеличение длины анкеров защитного экрана для опирания их концов за пределами призмы сползания позволяет повысить устойчивость грунтовых обнажений в забое.

Ключевые слова: подземное строительство, напряжения, смещения, упрочнение, анкерование, моделирование; метод конечных элементов.

Введение

Рост населения в крупных городах значительно усложняет функционирование поверхностной транспортной и инженерной инфраструктур [1, 2]. Поэтому в последнее время, для сохранения ландшафта и исторических территорий мегаполисов наблюдается увеличение объёмов освоения подземного пространства [3-5].

Подземное строительство требует очень больших капитальных затрат, поэтому проходание выработок стремятся осуществлять на небольшой глубине. В этом случае объекты возводятся в наносных породах, которые характеризуются очень сложными условиями. Для строительства магистральных тоннелей используются высокопроизводительные щитовые комплексы, обеспечивающие проходку наибольших объёмов выработок. Однако нормальное функционирование транспортных объектов невозможно без возведения большого числа вспомогательных подземных объектов, разветвленных переходов и других выработок небольшой протяжённости.

Строительство сооружений небольшой длины, сложной

конфигурации и траектории при отсутствии возможности применения эффективных щитовых комплексов, характеризуется значительными трудовыми, финансовыми и материальными затратами. Кроме этого, имеют место очень сложные и опасные условия выполнения работ.

Анализ показывает, что ежегодное число провалов грунта в Москве не уменьшается, несмотря на широкое применение самых современных технологий строительства подземных объектов. Нарушения сплошности грунта в зоне строительства сопровождается деформациями грунтового массива и поверхности земли [6, 7].

Строительство подземных сооружений небольшой протяженности в грунтах как правило осуществляется под защитой временной крепи, возведение которой характеризуется большими трудовыми и материальными затратами. Также большие затраты труда требуются на демонтаж временной крепи при возведении постоянной обделки, что также сопровождается деформациями массива из-за релаксации напряжений. Поэтому большинство обрушений происходит именно во время крепления, что требует обеспечения безопасности работ.

По мнению специалистов, в Москве суммарная площадь потенциально опасных для строительства участков достигает 15 кв. км. Таким образом, совершенствование методов и средств строительства выработок небольшой протяженности в грунтовых массивах сохраняет актуальность, несмотря на многолетний положительный опыт их возведения.

Выбор и обоснование методики исследований

Существенного снижения затрат при строительстве выработок в малоустойчивых грунтах, на наш взгляд, можно добиться при применении опережающего анкерования, суть которого заключается в предварительном, до начала выемки грунта, устройстве вдоль оси сооружения над сводом или по всему контуру опережающего защитного экрана из стальных труб,

располагающихся в пробуренных скважинах. Такой метод укрепления основывается на изготовлении арок из металлических труб и уплотненного грунта вокруг них при помощи инъекции смеси на цементной основе.

В России эта технология успешно применена при строительстве автодорожных тоннелей №8 и 8а в г. Сочи в зонах тектонических нарушений. Несмотря на очень большой объём работ по упрочнению грунтов свода, стен и забоя опережающим анкерованием, при проходке наблюдались многочисленные вывалы в центральной части забоя.

Для выявления причин возможных чрезмерных смещений грунтовых обнажений при применении упрочняющих конструкций в забойной зоне, на примере строительства демонтируемой камеры №1 Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена, моделированием методом конечных элементов (МКЭ) проведена оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива и защитного экрана из стальных труб длиной до 15 м.

При выемке грунта, обнаженный вертикальный забой, будет подвержен воздействию сползающего массива в виде призмы, размеры которой зависят от характеристик грунта и размеров выработки. В грунтах с углом внутреннего трения $12 - 22^\circ$, даже без учета вертикального горного давления, верхнее основание призмы сползания может превышать 10 м. В этом случае, при рекомендуемой длине труб защитного экрана 15 – 18 м, через 2 – 3 заходки, трубы опережающей крепи впереди забоя будут опираться на грунт в зоне призмы сползания. То есть, анкеры в своде выработки можно рассматривать, как многопролетную балку одним концом, опирающуюся на деформируемое основание, следовательно, сопротивление грунта в призабойной зоне будет практически отсутствовать. При этом схему работы анкеров защитного экрана можно рассматривать, как консоль с максимальным изгибающим моментом неразрезной балки на раме временной крепи.

Несущая способность такой конструкции анкеров будет определяться только моментом сопротивления стальной трубы, заполненной цементным раствором, поскольку тонкий внешний слой раствора выполняет лишь изолирующие функции. В результате даже при толщине вышележащего слоя грунта всего 5 м, изгибающий момент превысит момент сопротивления трубы анкера при длине консоли немногим более двух метров. То есть, защитный экран не может выполнять свои функции. Таким образом, необходимо детальное исследование НДС системы «грунтовый массив – тоннель – защитный экран».

Для исследований принято моделирование МКЭ, который получил наибольшее распространение для решения геомеханических задач [8-10].

Напряженное состояние подземных объектов характеризуется в основном действием гравитационных сил. Поэтому для описания напряженного состояния массива горных пород принята механическая модель, представляющая собой полупространство, ограниченное горизонтальной поверхностью. При этом грунтовый массив принимаем однородным, изотропным и линейно-деформированным [11-13].

В практике подземного строительства основным критерием оценки устойчивости породных обнажений являются смещения незакрепленного породного контура. Поэтому МКЭ в данном случае позволит наиболее объективно оценить поведение забоя при сложном НДС грунтового массива [11-13].

Основными факторами, определяющими смещения контура выемки, являются: величина горного давления; физико-механические свойства пород; размеры выработки и величина заходки. Поскольку горное давление зависит от ширины выработки, то оставим наиболее обобщающий фактор – горное давление, а ширину можно исключить из рассмотрения. Оставшиеся факторы позволяют моделировать процесс упрочнения опережающим анкерованием в

плоской постановке задачи. Для моделирования системы «грунтовый массив-тоннель-защитный экран» методом конечных элементов использован программный комплекс «Plaxis».

В принятой упругопластической модели массива характеристики пород задавались путём назначения конечным элементам жёсткости соответствующих свойств. Горное давление формируется программой автоматически, путем приложения нагрузки ко всем конечным элементам их собственного веса при изменении глубины заложения выработки.

Последовательность моделирования принята следующей: по условиям строительства демонтажной камеры составлены модели без опережающего анкерования, затем составлены модели с анкерами длиной 12 м и 18 м. Оценка деформационных процессов осуществлялась по максимальным смещениям забоя.

Результаты расчётов моделей

Анализ деформационных схем выработки без защитного экрана, представленных на рис. 1, свидетельствует о формировании призмы сползания с деформацией забоя и поверхности земли до 16,8 мм при высоте слоя пород над сооружением - 5 м.

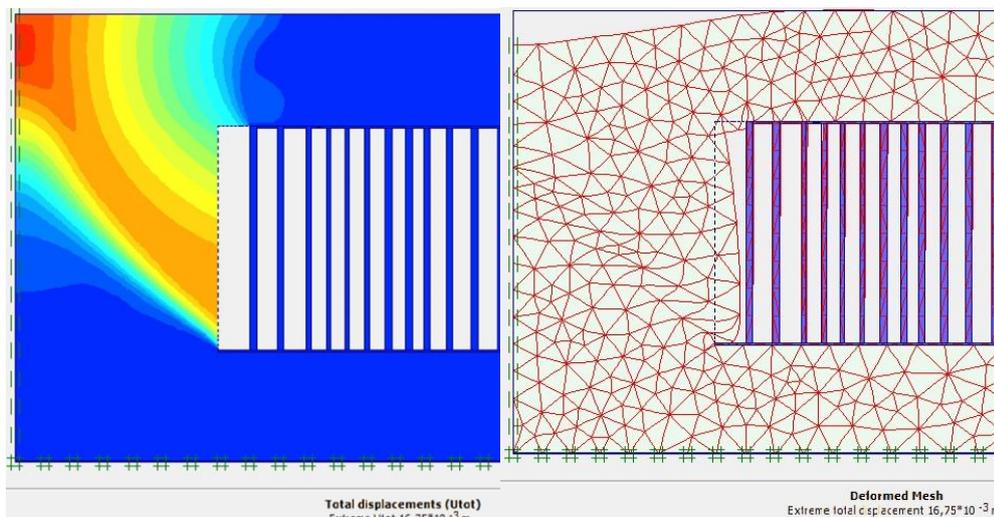


Рис. 1. – Деформационная схема грунтового массива в забойной зоне выработки

Полученные в результате моделирования деформационные схемы с защитным экраном длиной до 15 м, при толщине слоя вышележащего грунта 5 м, свидетельствуют о том, что применение экрана снижает смещения в 2,5 раза и составляют 6,7 мм. Однако, при увеличении заходки до 2 м, наблюдается увеличение смещений не только забоя, которые достигают 21,45 мм, но и деформаций поверхности.

На моделях с глубиной заложения 10 м установлено, что после прохождения 1 м выработки, перед формированием очередной заходки, максимальные смещения наблюдаются в забойной зоне и составляют 110 мм. Это объясняется тем, что анкеры защитного экрана впереди забоя располагаются в зоне призмы сползания грунта и работают по самой неблагоприятной схеме – консольной, и не предотвращают смещений грунта.

Также установлено, что увеличение длины анкеров до 18-24 м позволяет изменить схему работы анкеров и повысить несущую способность защитного экрана. Это обусловлено опиранием забойной части анкеров на грунт за пределами призмы сползания (рис. 2). При этом смещения снижаются почти в четыре раза, несмотря на увеличение слоя грунта над объектом до 10 м.

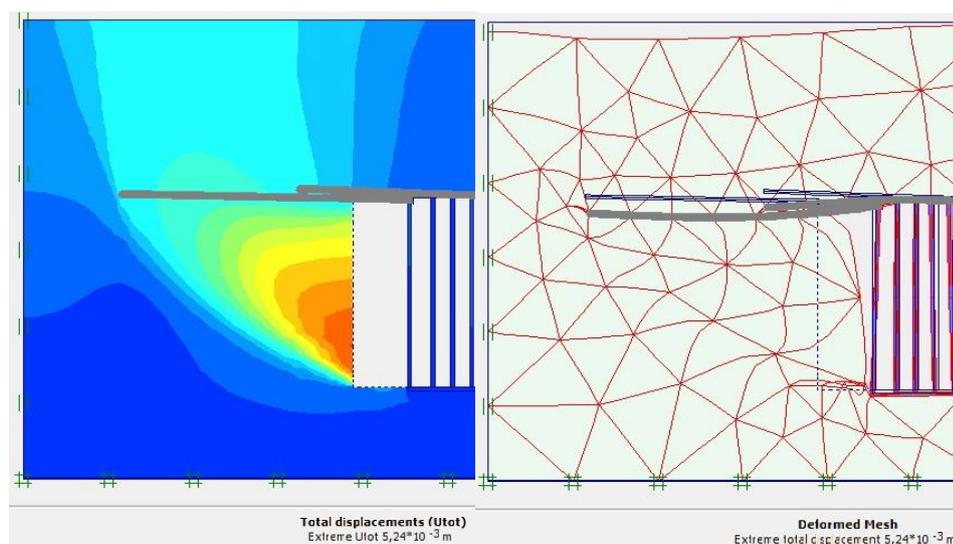


Рис. 2. – Схема деформирования грунта забоя и анкеров при глубине 10 м, величине заходки 2 м, и длине анкеров 18 м

Оценка влияния закрепления забоя анкерами приведена на рис. 3, что свидетельствует о нецелесообразности распределения анкеров по всей площади забоя. В то же время установка анкеров только в нижней части забоя позволяет уменьшить смещения почти в 2 раза.

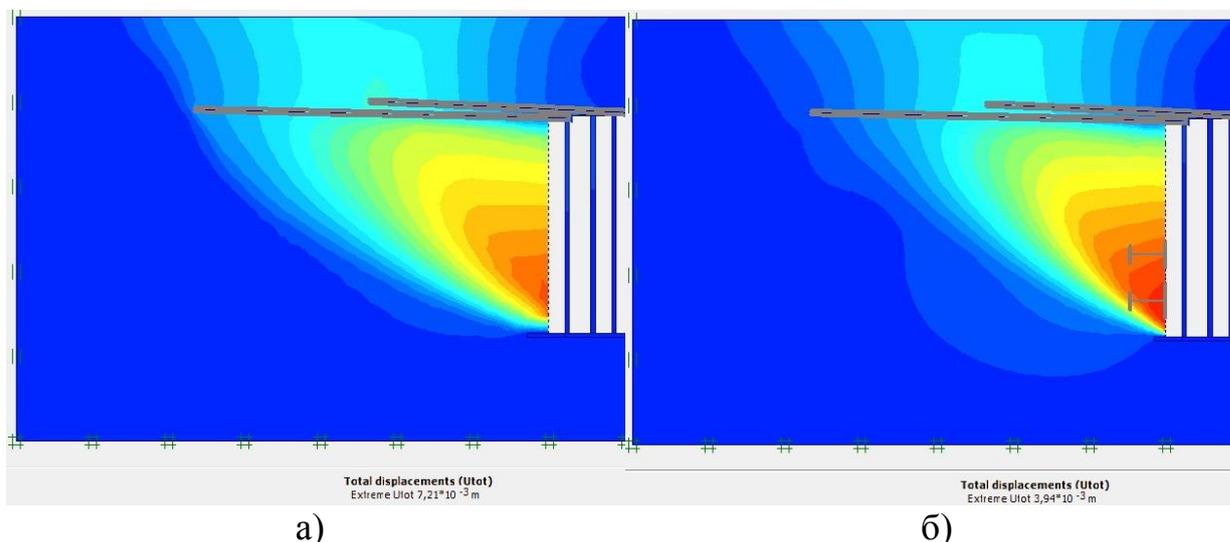


Рис. 3. – Распределение смещений грунта забоя: а – без крепления фиброглассовыми анкерами; б – с креплением двумя рядами анкеров

Заключение

Упрочнение свода выработок опережающим анкерованием при строительстве подземных сооружений позволяет значительно снизить смещения грунтовых обнажений, однако полностью исключить вывалы грунта не удаётся.

Установлена неэффективная работа анкеров защитного экрана при их расположении в зоне призмы сползания.

В результате выполнения комплекса исследований НДС, системы «грунтовый массив – тоннель – защитный экран» моделированием МКЭ установлено, что повысить устойчивость грунтовых обнажений в забое можно увеличением длины анкеров защитного экрана для опирания их концов за пределами призмы сползания.

Литература

1. Беляев В. Л. Планирование градостроительного освоения подземного пространства г. Москвы // Вестник МГСУ, 2013, № 1. С. 35-46.
2. Беляев В. Л. Неотложные задачи развития подземного пространства столицы // Недвижимость: экономика, управление. 2011. № 1. С. 77-79.
3. Челюканова Е. Э., Горбунова В. С. Подземное пространство как резерв дополнительной полезной площади // Перспективы науки и образования. 2013. № 6. С. 189-194.
4. Arnau O., Molins C. Three Dimensional Structural Response of Segmental Tunnel Linings // Engineering Structures, 2012, № 44. pp. 210-221.
5. Yanzhi Y., Weiwei Z., Jianwei W., Zhihao, Y. Three-dimensional orthotropic equivalent modelling method of large-scale circular jointed lining // Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, № 44, Pp. 33–41.
6. Павленко А.М. Предотвращение сдвижений дневной поверхности при проходке тоннеля большого диаметра // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2008, №9. С. 170-173.
7. Namazi E., Mohamad H., Hong A., Hajihassani M., Jusoh S., Abad S. Ground behaviour around a tunnel using various soil models // Electronic Journal Geotechnics Engineering (EJGE), 2012, № 17. pp. 609-621.
8. Трушин С.И. Метод конечных элементов. Теория и задачи: учебное пособие. М.: АСВ, 2008. 256 с.
9. Прокопов А.Ю. Изучение напряженно-деформированного состояния грунтового массива и взаимного влияния подземных конструкций существующих и вновь возводимых сооружений в береговой зоне морского порта Тамань // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2104
10. Фадеев А.Б. Параметры модели упрочняющегося грунта программы «Plaxis» // Численные методы расчетов в практической геотехнике: Сборник

статей международной научно-технической конференции. СПб.: СПбГАСУ, 2012. С. 13-20.

11. Kisse A.A. Consistent Failure Model for Probabilistic Analysis of Shallow Foundations // Proc. of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011). Munich, 2011. pp. 385-392.

12. Jusoh S., Mohamad H., Marto A., Kassim F. Assessment on Segment Joint to Improve Soil-Tunnel Interaction // MATEC Web of Conferences, 2018, Vol. 250. URL: doi.org/10.1051/matecconf/201825001005.

13. Chernysheva N., Rozin L. Modified finite element analysis for exterior boundary problems in infinite medium // MATEC Web of Conferences, 2016, Vol. 53. URL: doi.org/10.1051/matecconf/20165301042.

References

1. Belyaev V. L. Vestnik MGSU, 2013, № 1. pp. 35-46.
2. Belyaev V. L. Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie. 2011. № 1. pp. 77-79.
3. Chelyukanova E. E., Gorbunova V. S. Perspektivy nauki i obrazovaniya. 2013. № 6. pp. 189-194.
4. Arnau O., Molins C. Engineering Structures, 2012, № 44. pp. 210-221.
5. Yanzhi Y., Weiwei Z., Jianwei W., Zhihao, Y. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, № 44, pp. 33-41.
6. Pavlenko A.M. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten', 2008, №9. pp. 170-173.
7. Namazi E., Mohamad H., Hong A., Hajihassani M., Jusoh S., Abad S. Electronic Journal Geotechnics Engineering (EJGE), 2012, № 17. pp. 609-621.
8. Trushin S.I. Metod konechnykh elementov. Teoriya i zadachi: uchebnoe posobie [The finite element method. Theory and tasks: textbook]. M.: ASV, 2008. 256 p.
9. Prokopov A.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/8468



ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2104

10. Fadeev A.B. Parametry` modeli uprochnyayushhegosya grunta programmy` «Plaxis» [Parameters of the hardening soil model of the "Plaxis" program]. Chislenny`e metody` raschetov v prakticheskoj geotexnike: Sbornik statej mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii. SPb.: SPbGASU, 2012. pp. 13-20.

11. Kisse A.A. Consistent Failure Model for Probabilistic Analysis of Shallow Foundations. Proc. of the 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011). Munich, 2011. pp. 385-392.

12. Jusoh S., Mohamad H., Marto A., Kassim F. Assessment on Segment Joint to Improve Soil-Tunnel Interaction. MATEC Web of Conferences, 2018, Vol. 250. URL: doi.org/10.1051/matecconf/201825001005.

13. Chernysheva N., Rozin L. Modified finite element analysis for exterior boundary problems in infinite medium. MATEC Web of Conferences, 2016, Vol. 53. URL: doi.org/10.1051/matecconf/20165301042.