УДК 624.152.63

© К. В. Востриков, канд. техн. наук, доцент

© Л. О. Беляков, аспирант

(Сибирский государственный университет путей
сообщения)

E-mail: kochtas_V@mail.ru, lbelyakov@bk.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-1-57-63

© K. V. Vostrikov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© L. O. Belyakov, post-graduate student

(Siberian Transport University)

E-mail: kochtas_V@mail.ru, lbelyakov@bk.ru

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КОТЛОВАНОВ, АРМИРОВАННЫХ НАГЕЛЬНЫМИ СТЕРЖНЯМИ

TO THE ISSUE OF CALCULATING THE STABILITY OF OPEN PIT SLOPES REINFORCED WITH GROUND NAILS

В практике проектирования применяют различные способы крепления бортов котлованов, методика подбора параметров которых в настоящее время проработана достаточно подробно, однако для нагельного крепления такая методика в отечественной литературе практически отсутствует. Рассмотрена проблема оценки устойчивости бортов котлована, армированных нагельными стержнями. Выполнено определение значений предельных вертикальных напряжений при «прорезании» грунта боковой поверхностью армоэлемента. Проведено сопоставление результатов расчета устойчивости при моделировании нагельных стержней структурными элементами типа nail, geogrid и plate, в том числе с учетом крепления поверхности бортов котлована.

Ключевые слова: геотехнический расчет, грунт, коэффициент устойчивости, крепление бортов котлована, нагельный стержень, армогрунтовая стена, метод конечных элементов, OptumG2.

In the practice of design, various methods of reinforcing the pit walls are used, wherein the technique for selecting the parameters has now been sufficiently elaborated. However, the technique involving the usage of the ground nail reinforcement is hardly mentioned in the domestic literature. The article discusses the problem of estimating the stability of the excavation pit slopes reinforced with ground nail rods. The values of the maximum vertical stresses are determined regarding possible «cutting» of the soil with the lateral surface of the reinforcing element. The results of stability calculations obtained by the simulation of nail rods with structural elements of the «nail», «geo-grid» and «plate» types, taking into account the reinforcement of the excavation pit wall surface are compared.

Keywords: geotechnical calculation, soil, safety factor, reinforcement of the excavation pit slopes, ground nail, reinforced ground wall, finite elements method, OptumG2.

В условиях плотной городской застройки строительство высотных зданий производится с развитой подземной частью, устройство которой, в связи с ограниченностью площади пятна застройки, вызвано необходимостью размещения большого количества парковочных мест.

Для возведения подземной части здания возникает необходимость разработки котлованов значительной глубины (7–12 м, а иногда и более),

выполнить которые с естественными откосами не представляется возможным. Поэтому применяют различные способы повышения устойчивости (крепления) бортов котлованов, такие как стена в грунте, ограждение из буровых свай, шпунтовые ряды, химическое закрепление, цементация, анкерное крепление и другие.

Одним из способов повышения устойчивости грунтовых откосов, применяемым в том

числе для крепления бортов котлованов, является устройство нагельного крепления. Согласно указаниям СП 45.13330.2017 «Земляные сооружения, основания и фундаменты»¹, нагельное крепление представляет собой геотехническую конструкцию, предназначенную для обеспечения устойчивости грунтовых откосов и стен котлованов системой нагелей, армирующих прилегающий массив грунта. Такая система стержней приводит к формированию самонесущей массивной подпорной стены.

Опыт применения нагельного крепления показал, что такой способ зачастую является наиболее экономичным, если техногенные условия площадки не осложнены наличием зданий и сооружений в непосредственной близости к бровке котлована. К недостаткам нагельного крепления можно отнести ограничение его применения в слабых грунтах.

В настоящее время применение нагельного крепления на территории РФ регламентируется указаниями СП 45.13330.2017² и СТО НОСТРОЙ 109–2013³. Однако широкому распространению и внедрению в практику строительства нагельного крепления бортов котлованов препятствует тот факт, что в данных нормативных документах практически не описаны способы подбора параметров крепи и последующего ее расчета по I и II группам предельных состояний. Приводятся лишь требования к конструкциям нагелей, способам их приемки, контролю качества и испытаниям. Также даны общие рекомендации по расположению нагелей в грунтовом массиве. Информация же о назначении длины, типа и диаметра нагельных стержней в указанных документах отсутствует. В ранней редакции СТО-ГК «Трансстрой»-013–2007⁴ давалась проверка правильности подбора длины нагелей путем вычисления коэффициентов устойчивости армогрун-

товой стены против сдвига и опрокидывания силами активного давления. В обновленной версии СТО⁵ указанная проверка исключена.

В зарубежной нормативной литературе методика подбора параметров крепи представлена также не в полном объеме⁶.

Обзор отечественной научной литературы показал, что проблемой расчета нагельных конструкций в разное время занимались сотрудники СГУПС [1–3], в результате чего был предложен ряд формул, которые, однако, имеют ограниченную сферу применения. Предложенные в указанных работах формулы учитывают только работу нагелей на выдергивание. «Прорезание» стержнями грунтового массива при этом не учитывается. Аналогичная ситуация сложилась и в зарубежной литературе [4–5].

Для оценки устойчивости грунтовых откосов, в том числе армированных, широкое практическое применение получил метод SRM (strength reduction method), реализуемый в программных продуктах на основе метода конечных элементов (МКЭ). Моделирование нагельных стержней при этом зачастую осуществляется в плоской постановке (2D) посредством применения структурных (конструктивных) элементов типа plate (beam) и geogrid с заданием соответствующих характеристик жесткости при растяжении-сжатии EA и изгибе EI [6–7].

Также в ряде программных комплексов реализован расчет нагельной крепи на основе аналитических зависимостей, в которых участвует только сопротивление нагельного стержня выдергиванию.

С недавнего времени в ряде программных продуктов на основе МКЭ появилась возможность моделирования стержневой крепи структурными элементами типа nail, особенность работы которых подробно описана в статье J. M. M. Sluis, F. Besseling и P. H. N. Stuurwold [8]. В качестве исходных данных для такого элемента необходимо ввести величину погонного трения (axial strength $F_{A\max}$, кН/м) и сопротивления грунта «прорезанию» боковой поверхностью стержня (lateral strength $F_{L\max}$, кН/м). Поиск информа-

¹ СП 45.13330.2017. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01–87. М.: Минстрой России, 2017. 179 с.

² СП 45.13330.2017. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01–87. М., 2017.

³ СТО НОСТРОЙ 109–2013. Устройство грунтовых анкеров, нагелей и микросвай. Правила и контроль выполнения, требования к результатам работ. М.: Филиал ОАО ЦНИИС НИЦ «Тоннели и метрополитены», 2013. 215 с.

⁴ СТО-ГК «Трансстрой»-013–2007. Нагельное крепление котлованов и откосов в транспортном строительстве. М.: ТРАНССТРОЙ, 2007. 34 с.

⁵ СТО НОСТРОЙ 109–2013. Устройство грунтовых анкеров, нагелей и микросвай. М., 2013.

⁶ DIN 21521-2:1993-02. Rock bolts for mining and tunnel support; general specifications for steel-bolts; tests, testing methods. ICS:73.100.10. 1993. 7 p.

ции о последнем параметре показал, что его вычисление является достаточно сложной задачей, так как в литературе в основном указывается на необходимость определения его в полевых условиях (эмпирическим путем).

Для возможности определения указанного параметра путем теоретических расчетов в [9] предложена методика, учитывающая «прорезание» грунта боковой поверхностью нагельных стержней. В ней дано решение по нахождению величины предельных вертикальных напряжений p_u при «прорезании» армоэлементом грунта без учета глубины его расположения, полученное с использованием решений теории предельного равновесия грунтов [9]

$$p_u = N_\gamma \gamma d + N_c c, \quad (1)$$

где γ — удельный вес грунта, кН/м³; d — диаметр стержня, м; c — удельное сцепление грунта, кПа; N_γ , N_c — коэффициенты, вычисляемые по формулам

$$N_\gamma = (0,32 + 0,488 \cdot e^{3,393 \tan \varphi}) / \pi; \quad (2)$$

$$N_c = (2 + 4,3066 \cdot e^{2,355 \tan \varphi}) / \pi, \quad (3)$$

где φ — угол внутреннего трения грунта, град.

В настоящее время в практике проектирования геотехнических объектов активно начинает использоваться программный комплекс OptumG2. Его отличительными особенностями являются возможность расчета предельной нагрузки, которую может воспринимать грунт основания, а также автоматическое построение адаптивной сетки конечных элементов, сгущение которой происходит в областях наибольшей концентрации напряжений [10].

Авторами была поставлена задача оценить, насколько влияет учет глубины заложения нагельных стержней на итоговую устойчивость армогрунтовой стены. Для этого в конкретных инженерно-геологических условиях выполнена серия итерационных расчетов с заранее заданными диаметром и шагом нагельных стержней в вертикальном и горизонтальном направлениях. При этом авторы исходили из следующего предположения: слои грунта, расположенные выше предыдущего яруса стержней, не сопротивляются «прорезанию», т. е. указанный грунт оказывает лишь гравитационное воздействие на рассматриваемый грунтовый слой. Фрагмент предложенной схемы расчета предельных «прореза-

ющих» напряжений p_u представлен на рис. 1, а, очертание области выпора (потери устойчивости) — на рис. 1, б.

Результаты расчетов показали высокую сходимость значений p_u с результатами теоретических расчетов по формуле (1).

В программном комплексе OptumG2 для конкретного примера был дополнительно произведен сравнительный анализ результатов расчета коэффициентов устойчивости при моделировании нагельных стержней структурными элементами:

- типа nail без учета «прорезания» стержнями грунта;
- nail при расчете p_u без учета глубины расположения стержня;
- nail при расчете p_u с учетом глубины расположения стержня;
- geogrid с приведенными характеристиками жесткости EA ;
- plate с приведенными характеристиками жесткости EA и EI .

Примеры фрагментов составленных расчетных схем представлены на рис. 2.

Деформированный вид схем и поверхности потери устойчивости для каждого расчетного случая представлены на рис. 3–5.

Кроме того, был проведен анализ влияния наличия (отсутствия) защитного покрытия откоса на устойчивость армогрунтового массива. Конкретно для рассмотренных случаев защитное покрытие представляло собой деревянные щиты, моделируемые структурными элементами типа plate. Результаты выполненных расчетов представлены на рис. 6.

Значение предельно допустимого коэффициента устойчивости, согласно СП 43.13330.2012 «Сооружения промышленных предприятий»⁷, принято равным $k_{su} = 1,15$.

По результатам выполненных расчетов было установлено следующее:

1. Учет глубины расположения нагеля при расчете предельных вертикальных «прорезающих» напряжений p_u оказывает незначительное влияние на итоговое значение коэффициента устойчивости.

⁷ СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03–85. М.: Минстрой России, 2011. 106 с.

Рис. 1. Расчет предельных «прорезающих» напряжений: а — схема расчета; б — очертание области выпора (потери устойчивости)

Рис. 2. Фрагмент схемы расчета устойчивости при моделировании нагельных стержней элементами: а — nail; б — geogrid, plate

Рис. 3. Деформированный вид схем и поверхности потери устойчивости при моделировании нагельных стержней элементами: а — nail без учета «прорезания» стержнями грунта; б — nail с расчетом p_u без учета глубины расположения стержня; в — nail с расчетом p_u с учетом глубины расположения стержня

2. Установка защитного покрытия откоса (деревянных щитов для рассмотренного случая) приводит к значительному повышению устойчивости армогрунтовой конструкции, особенно при моделировании нагельных стержней структурными элементами типа nail.

3. Моделирование нагелей элементами типа geogrid и plate приводит к получению завышенных значений коэффициентов устойчивости.

Рис. 4. Деформированный вид схемы и поверхность потери устойчивости при моделировании нагельных стержней элементами geogrid

Рис. 5. Деформированный вид схемы и поверхность потери устойчивости при моделировании нагельных стержней элементами plate

4. Наиболее достоверной картины деформирования удалось достигнуть при использовании элементов типа nail с учетом сопротивления грунта «прорезанию». При моделировании нагельных стержней элементами geogrid и plate за пределами армогрунтовой подпорной стены формируется «клин скольжения», чего не наблюдается в реальности.

Таким образом, применение структурных элементов типа nail, расчет которых реализован в программном комплексе OptumG2, позволяет получить более достоверные результаты в расчетах устойчивости бортов котлована.

Библиографический список

1. Савельев Ю. Н. Облегченная стержневая крепь при строительстве тоннельных сооружений Новосибирского метрополитена: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2002. 155 с.

Рис. 6. Значения коэффициентов устойчивости в зависимости от принятой модели нагелей

2. Кесарев М. С., Немцев Д. А. Приближенный метод расчета нагельного крепления // Инженерная геология, механика грунтов, основания и фундаменты. Новосибирск: СГУПС, 2007. С. 140–144.

3. Востриков К. В., Скоркин В. Ф. К вопросу расчета параметров нагельного крепления бортов котлованов // Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение: материалы междунар. науч.-техн. конф., посв. 80-летию образования каф. геотехники СПбГАСУ и 290-летию российской науки. СПб.: СПбГАСУ, 2014. Ч. I. С. 427–434.

4. Tuozzolo T. J. Soil nailing: where, when and why a practical guide // 20th Central Pennsylvania Geotechnical Conference Hershey, PA, 2003. 26 p.

5. Babu G. L. S. Lecture 33: Ground improvement ground reinforcement using soil nailing // NPTEL course. 68 p.

6. Babu G. L. S., Singh V. P. Simulation of soil nail structures using Plaxis 2D // Plaxis Bulletin. Spring ISSUE. 2009. Pp. 16–21.

7. Sharma L. M., Sapkota B. K. Soil nails at gateway to Nebraska // 62nd Highway Geology Symposium, 2011. 18 p.

8. Sluis J. M. M., Besseling F., Stuurwold P. H. H. Modelling of a pile row in a 2D plane strain FE-analysis // Numerical Methods in Geotechnical Engineering. ISBN 9781138001466. 2014. Vol. 1. Pp. 277–282.

9. Кузнецов А. О., Полянкин Г. Н. Методика расчета устойчивости грунтовых массивов, армированных горизонтальными стержнями круглого сечения // Метро и тоннели. 2017. № 1–2. С. 36–38.

10. Krabbenhoft K. OptumG2: theory. Optum Computational Engineering, 2017. 85 p.

References

1. Savelev Yu. N. *Oblegchennaya sterzhnevaya krep' pri stroitel'stve tunnel'nykh sooruzheniy Novosibirskogo metropolitena. Diss. kand. tekhn. nauk* [Facilitated rod timbering at construction of tunnel structures of the Novosibirsk subway. PhD in Sci. Tech. diss.]. Novosibirsk, 2002, 155 p.

2. Kesarev M. S., Nemtsev D. A. *Priblizhennyy metod rascheta nagel'nogo krep'leniya* [Approximate method of calculation of ground nail rod reinforcement]. *Inzhenernaya geologiya, mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenti* [Engineering geology, mechanics of soil, bases and foundations]. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2007, pp. 140–144.

3. Vostrikov K. V., Skorkin V. F. *K voprosu rascheta parametrov nagel'nogo krep'leniya bortov kotlovanov* [To the issue of calculating the parameters of ground nail rod reinforcement of pit slopes]. *Trudy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy 80-letiyu obrazovaniya*

kaf. geotekhniki SPbGASU i 290-letiyu rossiyskoy nauki «Sovremennye geotekhnologii v stroitel'stve i ikh nauchno-tekhnicheskoe soprovozhdenie» [Proc. of the Int. sci.- pract. conf. devoted to the 80-th anniversary of geo-engineering department of the SPSUACE and to the 290-th anniversary of the Russian science "Modern geo-technologies in construction and their scientific and technical support"]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2014, Pt. 1, pp. 427–434.

4. Tuozzolo T. J. *Soil nailing: where, when and why a practical guide*. 20th Central Pennsylvania Geotechnical Conference Hershey, PA, 2003, 26 p.

5. Babu G. L. S. *Lecture 33: Ground improvement ground reinforcement using soil nailing*. NPTEL course, 68 p.

6. Babu G. L. S., Singh V. P. Simulation of soil nail structures using Plaxis 2D. *Plaxis Bulletin*, Spring ISSUE, 2009, pp. 16–21.

7. Sharma L. M., Sapkota B. K. *Soil nails at gateway to Nebraska*. 62nd Highway Geology Symposium, 2011, 18 p.

8. Sluis J. M. M., Besseling F., Stuurwold P. H. H. Modeling of a pile row in a 2D plane strain FE-analysis. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, ISBN 9781138001466, 2014, vol. 1, pp. 277–282.

9. Kuznetsov A. O., Polyankin G. N. *Metodika rascheta ustoychivosti gruntovykh massivov, armirovannykh gorizontaľnymi sterzhnyami kruglogo secheniya* [Technique of calculating the stability of soil massif reinforced with horizontal rods of round section]. *Metro i tonneli – Subway and tunnels*, 2017, no. 1–2, pp. 36–38.

10. Krabbenhoft K. OptumG2: theory. *Optum Computational Engineering*, 2017, 85 p.