Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2020, №2, Том 7 / 2020, No 2, Vol 7 <https://t-s.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/10SATS220.pdf>

DOI: 10.15862/10SATS220 (<http://dx.doi.org/10.15862/10SATS220>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Горшков Н.И., Краснов М.А., Юань Ц., Жданова С.М. Особенности напряженно-деформированного состояния систем «выемка – геосреда» и «насыпь – геосреда» в процессе моделирования их возведения (часть I) // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/10SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/10SATS220

For citation:

Gorshkov N.I., Krasnov M.A., Yuan J., Jdanova S.M. (2020). Peculiarities of the stress-strain state of the “excavation – geo-environment” and “embankment – geo-environment” systems in the process of erecting them (part I). *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/10SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/10SATS220

УДК 72

Горшков Николай Иванович

ФБГОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Профессор кафедры «Автомобильные дороги»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: Fem_soft@mail.ru

Краснов Михаил Александрович

ФБГОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Инженер кафедры «Автомобильные дороги»
E-mail: Mike_mail@mail.ru

Юань Цзинвэнь

ФБГОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Аспирантка кафедры «Автомобильные дороги»
E-mail: 444703108@qq.com

Жданова Светлана Мирзахановна

ФБГОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия
Профессор кафедры «Строительства»
Доктор технических наук, профессор
E-mail: mirzahanovna@mail.ru

Особенности напряженно-деформированного состояния систем «выемка – геосреда» и «насыпь – геосреда» в процессе моделирования их возведения (часть I)

Аннотация. Выемки и насыпи являются наиболее распространёнными грунтовыми транспортными сооружениями, эксплуатационная надежность и долговечность которых определяется устойчивостью их бортов и откосов. В первой статье рассматриваются особенности напряженно-деформированного состояния и изменения в устойчивости грунтовых транспортных сооружений (выемок) на основе моделирования по сертифицированной программе метода конечных элементов GenIDE32. При моделировании выполнялась послойная экскавация однородного грунта из выемок с конечными геометрическими размерами. В

массиве борта выемки, в поле вектора смещений u_i , возникают слабоизученные явления в виде «кругов вращения» или кратко вихрей. Эти, недавно обнаруженные в модельных опытах явления (Ю.И. Соловьев, 1956), требуют в перспективе детального исследования. Графические результаты выполненных расчетов позволяют увидеть возникновение и развитие зон «пластичности» или предельного состояния в виде зон «сдвига-сжатия», «сжатия-сдвига» и «растяжения». Зоны «сдвига-сжатия» и наоборот показываются в виде заштрихованных под углом крестообразно конечных элементов, зоны «растяжения» показываются в виде заштрихованных вертикально, горизонтально и вертикально, и горизонтально конечных элементов. Эти зоны, в процессе моделирования, вырисовывают в бортах выемок призму оползания с вертикальными и горизонтальными трещинами. Контур призмы оползания хорошо проявляют себя при выводе на экран уровней значений средней относительной объемной деформации ϵ . Вывод на экран расчетной схемы в двух цветах значений этой величины фиксирует на этом рисунке контуры оползня. Линии скольжения с минимальным значением коэффициента запаса устойчивости $k_{st \min}$ проходят вблизи границ, где значения этой величины равны нулю. На таком рисунке, в верхней части массива, видны места образования вертикальных трещин. В анализе также используются графики траекторий изменения напряженно-деформированного состояния в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ϵ_{ij} в значимых узлах и конечных элементах, расположенных, в том числе, в местах линий скольжения с $k_{st \min}$. Они дают возможность по графикам деформаций объема и формы увидеть, где находится система с расчетным условием, например, от условия, при котором образовалось тело оползня.

Ключевые слова: выемка; насыпь; грунт; геосреда; напряженно-деформированное состояние (НДС); устойчивость; поверхность скольжения; метод конечного элемента (МКЭ)

Введение

Современные автомобильные и железные дороги должны обеспечивать безопасность движения транспортных средств, пешеходов и быструю доставку грузов. В проектах это обеспечивается заданием соответствующих продольных уклонов трассе, а при строительстве дорог реализуется в возведении высоких насыпей, разработке глубоких выемок, прохождении дорог по косогорам, в стесненных городских и других условиях. Борты и откосы этих устраиваемых на склонах грунтовых сооружений, должны быть устойчивы во время строительства и эксплуатации дорог. В теле дороги и вмещающей её геологической среде в процессе строительства образуются оползневые тела, главные визуальные признаки которых на поверхности массива – горизонтальные и вертикальные трещины, крайние из которых ограничивают эти тела в плане и по высоте.

Со времени появления первых инженерных методов оценки устойчивости грунтовых сооружений (Швеция, начало XX века) прошло более века [1; 2]. Эти методы, развитые исследователями за прошедшие годы и реализованные в современных программах, до сих пор используются в практике их проектирования.

Возникшие во второй половине прошлого века численные методы расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) систем «сооружение – геосреда» также стали использовать в оценке устойчивости этих систем [3–7 и др.]. Некоторые программные средства позволяют увидеть на экране компьютера и место потенциальной линии скольжения, и тело

оползающего массива грунта [8–11 и др.]. В программных средствах используются разработанные их авторами критериальные условия оценки устойчивости систем, в том числе с использованием условий инженерных методов.

В XXI веке исследовательскими задачами станут задачи, связанные с выяснением особенностей формирования НДС и устойчивостью систем «выемка – геосреда», «насыпь – геосреда» и их производных. Первые исследования в этом направлении уже начались. Инженерные методы оценки устойчивости, основанные на теории предельного состояния, не «понимают» разницы в НДС таких грунтовых сооружений, как выемка и насыпь. Между тем, процесс образования оползневых тел в грунтовых массивах бортов выемок и откосов насыпей происходит неодинаково, в первом случае массив сначала разгружается, а потом нагружается, во втором, всегда нагружается. Разница между разгрузкой и нагрузкой грунтов бортов и откосов в процессе моделирования устройства грунтовых сооружений хорошо определяется графически, в узлах и КЭ, с помощью инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} [12].

Знание особенностей изменения НДС обозначенных систем укажет пути изучения более сложных природных и техногенных оползневых процессов (движение, разрушение, выветривание, ...), которые происходят в долинах рек, в предгорьях и горах из-за действия разных факторов.

Цели и средства решения задач исследования

Целью исследования является изучение особенностей изменения НДС однородных грунтовых массивов бортов (откосов) грунтовых сооружений (выемок и насыпей), а также явлений и процессов, возникающих при этом, включая эффект вращения и движения грунта вокруг каких-то точек грунтового массива, визуализации образования оползневых тел, их элементов и пр.

Средства решения задачи – численное моделирование, выполнялось на основе сертифицированной программы¹, в которой реализованы алгоритмы метода конечных элементов. В расчетах НДС использовалась нелинейная модель грунта на основе ассоциированного закона пластического течения с условием текучести по Кулону-Мору.

Общая схема решения задачи по определению НДС элементов системы «сооружение – геосреда» имеет вид:

- определение начального НДС природного массива грунтов;
- последовательное моделирование устройства грунтового сооружения;
- приложения транспортной нагрузки, если это необходимо.

Граничные условия по вектору смещений (условия закреплений) устанавливались из условия малого их влияния на результаты расчета. Использовались два варианта сетки разбивки с конечными элементами размером 1,10х1,10 и 0,55х0,55 м.

Для анализа НДС системы использовались все средства интерфейса программы, позволяющие выводить на экран значения вычисленных величин в виде уровней, эпюр, графиков и т. п.

¹ Программа GenIDE32 для решения прикладных задач геомеханики в строительстве / Горшков Н.И., Краснов М.А. СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ № RA.RU.AБ86.H01026, срок действия с 28.06.2017 по 27.06.2020. (www.femsoft.ru).

В процессе расчета, после появления в бортах (откосах) зон «пластичности» или зон предельного состояния выполнялась оценка их устойчивости. В GenIDE32 заложено семь методов оценки устойчивости [13].

Интерфейс программы позволяет выводить на экран компьютера поля вектора смещений u_i в виде трех результатов каждого расчета: «абсолютный»; «от начального НДС»; «между этапами изменения» расчетной схемы, как по технологии (экскавации, ...), так и по приложенным нагрузкам.

Результаты решения

В недавней статье [14], её авторы привели как пример малоизученное явление, связанное с вращением грунта вокруг какой-то точки основания. Как указывают авторы, это явление, «круг вращения», впервые экспериментально зафиксировал в своих опытах с ограждениями проф. Ю.И. Соловьев (1956). Авторы статьи смоделировали этот опыт в решении, выполненном численно на основе программы PLAXIS 2D. Результаты расчетов представили, как поле вектора смещений, где виден «круг вращения», для краткости, квазивихрь. Как известно, настоящие вихри образуются при турбулентном движении жидкостей и газов.

Авторы этой статьи по существу ставят вопрос: «Где и как возникают «круги вращения» вектора смещений в массивах грунтов, какие явления они отражают и как они, возможно, влияют на что-то, например, на их устойчивость, образование трещин и т. п.?».

В начале исследования на прикладных задачах были выполнены поисковые расчеты для ответа на вопрос: «Где возникают квазивихри?». Анализ результатов решения простых задач, связанных с послойным моделированием устройства однородных выемок, насыпей, в том числе с подкреплениями их откосов, показал, что квазивихри образуются там, где наблюдаются движения элементов сооружения в противоположных направлениях, например, поверхностей или конструкций (ограждения). В выемках так смещаются горизонтальные поверхности массива грунтов. В вертикальных ограждениях их верх и низ смещаются в противоположных направлениях, между которыми и образуются квазивихри. На границе смены направлений движения, на некоторой глубине или в створе рассмотренных линий и возникают квазивихри, рис. 1.

На рис. 1 приведены графические результаты расчетов **исследовательской задачи №1** по варианту №3 ($\gamma = 0,0207$ МН/м³, $\varphi = 22$ град., $c = 0,015$ МПа, $E = 45$ МПа, $\nu = 0,39$). «Круги вращения» становятся видны при выводе поля вектора смещений u_i «между этапами экскавации», для краткости назовем это квазивихрь1 и «от начального НДС», это квазивихрь2. Первые квазивихрь1 и квазивихрь2 появляются в одном месте после моделирования 1-го этапа экскавации грунта (рис. 1а). С каждым этапом экскавации центры квазивихрей перемещаются в сторону поверхностей борта выемки – верхней и наклонной. Выход последнего квазивихря1 на поверхность борта произошел между 7-м и 8-м этапами экскавации (рис. 1б). То же произошло при выводе поля вектора смещений u_i «от начального НДС» для квазивихря2 после 13-го этапа экскавации (рис. 1г).

В процессе моделирования экскавации грунта из выемки центры вращения квазивихрей1 и квазивихрей2 перемещались слева направо к поверхностям борта выемки, всегда оставаясь на уровне или выше некоторого предела по глубине. Для этого варианта расчета, для квазивихрей1, эта глубина равна 3,30 м, для квазивихрей2 2,20 м, рис. 2. Отметим, что значения предельной глубины центров вращения для квазивихрей2 сопоставимы со значением критической глубины трещины «отрыва», вычисленной по известной формуле: $h_{cr} = h_{90} = (2c/\gamma) \cdot \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi/2) = 2,15$ м.

Рисунок 1. Результаты расчетов авторов – поля вектора смещений u_i для системы «выемка – геосреда»: а) возникновение 1-ых квазивихря1 и квазивихря2 (на 1-ом этапе экскавации); б) зоны «пластичности» (сдвиг с сжатием и наоборот), выход квазивихря1 на поверхность борта (между 7-ым и 8-ым этапами); в) квазивихрь2 у поверхности борта, появление зон «пластичности» (растяжение) на 12-ом этапе, $k_{st\ min} \approx 0,98$; г) выход квазивихря2 к поверхности бровки борта и зон «растяжения» на поверхность борта (на 13-ом этапе, $k_{st\ min} \approx 0,98$)

На рисунке 2 показан путь движения слева направо центров вращения 8-ми квазивихрей1 в виде флажков в узлах и аналогичных 12-ти центров квазивихрей2, показанных в виде отметок по координате Y. Для всех вариантов расчетов с разными значениями заложения бортов 1:m, пути движения центров подобны, а значения глубин их расположения зависят, как и в формуле h_{cr} от параметров в неё входящих.

Авторы статьи участвуют в решении геотехнических задач в текущих проектах грунтовых сооружений таких отраслей строительства, как, транспортное (железно- и автодорожное), гидротехническое, горнотехническое, промышленное, гражданское и др. Вопросы появления и движения квазивихрей требуют специального исследования, как аналитического, так и экспериментального [15]. Просмотр архивных фотографий, выполненных для разных проектов, дал результат, рис. 3. Найдена фотография, на которой, слева, в верхней части борта глубокой выемки просматривается квазивихрь из обломков горных пород – глыбового грунта. Точно сделать выводы о причинах возникновения такой квазивихревой текстуры глыбового грунта пока невозможно! Но, в природе они есть, а в опытах на моделях их воспроизводят [15].

Рисунок 2. Результаты авторских расчетов – узлы с центрами вращений квазивихрей1 (флажки) и квазивихрей2 (координаты по Y)

Рисунок 3. Квазивихревое сложение глыбового крупнообломочного грунта вблизи поверхности глубокой выемки и трещины: км 450, ПК 52 автодорога «Лена» (фото С.М. Ждановой)

Зоны «пластичности» или предельного состояния (одноосное сжатие со сдвигом и наоборот – заштрихованные под углом крестообразно конечные элементы) появились в подножие борта выемки на 4-м этапе экскавации. Далее, по мере углубления выемки, они расширялись вверх и влево внутри борта выемки и немного вниз от её текущего подножия. После 12-го этапа экскавации между следами центров квазивихрей1 и квазивихрей2 возникли (см. рис. 1в) и далее развивались вверх и влево к горизонтальной поверхности борта зоны «пластичности» с растяжением (заштрихованные вертикально или горизонтально, а также вертикально и горизонтально конечные элементы), см. рис. 1г.

На том же 12-ом этапе грунт борта выемки перешел в предельное состояние по устойчивости, см. рис. 1в. Все линии скольжения с $k_{st\ min}$ (вариант «предельных касательных напряжений»: $k_{st} = \sum \tau_u / \sum \tau$) практически находятся в зоне предельного состояния. В верхней части линии пересекают конечный элемент (красная окраска), в котором все главные напряжения равны нулю: $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$.

На рис. 4а, для последнего 14-го этапа экскавации, когда полностью прорисовались контуры оползневого тела (рис. 7), показаны графики траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} для конечного элемента (КЭ), расположенного в подножии борта на выходе линии скольжения с $k_{st\ min}$ из него. Для этого графика траектории в пространстве $\sigma_i - \sigma$ изменялись следующим образом (рис. 4а): на **7-ом** начинается смена траектории «раздавливания» (разгрузка) на траекторию «удлинения» (нагрузка по девиатору σ_i и разгрузка по шаровому инварианту σ); а затем на траекторию «простого сдвига» с появлением длинной площадки «сдвига» в пространстве девиаторов $\sigma_i - \varepsilon_i$ (деформации формоизменения), где до 11-го этапа происходила разгрузка по σ_i , а после него нагрузка с выходом в площадку сдвига. В пространстве $\sigma - \varepsilon$ (деформации объема) до 14-го этапа происходит упругая разгрузка по σ и ε , на последнем участке при $\sigma = \text{const}$. На расчетной схеме на **7-ом** этапе уже не наблюдались квазивихри1, а на 12-ом в местах центров квазивихрей2 появились зоны «пластичности» (растяжения) и на 13-ом произошел выход квазивихрей2 на бровку борта выемки. Вид увеличенных конечных участков графиков всех траекторий нагружения указывает на окончание процесса формирования оползневого тела.

На рис. 4б изображены аналогичные графики характерные для КЭ, расположенных на линии скольжения ниже зон «пластичности» (растяжения) и выше подножия борта. На всех графиках в пространстве $\sigma_i - \sigma$ есть последний участок с разгрузкой по σ_i и σ , что также указывает на выход грунта борта в предельное состояние по устойчивости.

а)

б)

Рисунок 4. Результаты авторских расчетов (выемка – геосреда, $d_u = 15,4$ м, $1:t = 1:1$) – графики траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} (МПа) и относительных деформаций ε_{ij} : а) для КЭ в подножие борта; б) для КЭ, расположенных на линии скольжения выше подножия

Для КЭ, расположенных в начале линии скольжения и на ней же в зоне центров квазивихрей, характерны другие графики траекторий, рис. 5. Для графика на рис. 5а, после 8-го этапа экскавации, характерны линейные с упругой разгрузкой траектории по всем осям, кроме начального участка (начальное НДС). Графики с язычковыми изгибами, показанные на рис. 5б, вообще характерны для КЭ, расположенных в зоне центров квазивихрей.

а)

б)

Рисунок 5. Результаты авторских расчетов (выемка – геосреда) – графики траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} (МПа) и относительных деформаций ε_{ij} для КЭ (до 13-го этапа экскавации): а) в начале линии скольжения; б) в зоне центров вихрей

Возвращаясь к зонам «пластичности» (растяжение), можно сказать, что они всегда возникают на некотором расстоянии от горизонтальной поверхности внутри массива грунта борта сразу над зонами «пластичности» (сжатие+сдвиг и наоборот), когда его напряженное состояние приближается к предельному по устойчивости. В этом месте, на наш взгляд, происходит зарождение горизонтальных (отслаивание), а потом и вертикальных трещин, не выходящих до поры до времени на поверхности борта. Это отмечалось во всех результатах выполненных вариантов расчетов.

Возникшие зоны «пластичности» с растяжением являются результатом противоположных движений нижней (нагрузка) и верхней (разгрузка) частей образующегося оползневого тела. Возможно на это же указывают и графики зависимости $u_x - u_y$ для узлов, расположенных в зоне центров вихрей, где они имеют вид гистерезисных петель, как это изображено на рисунке 6. Расстояние от верха петель до места пересечения линий около 4 мм. Если вывести аналогичный график $u_x - u_y$ для узла подножия выемки, то он будет без гистерезиса.

По всему, нижняя часть возникающего оползневого тела, отрывается от его верхней части, которая превращается во временную полуарочную консоль, еще связанную с основным массивом грунтов, см. рис. 1в. При дальнейшей экскавации грунта (14-ый этап: $d = d_u = 15,40$ м) образуется тело оползня и трещины «отрыва» (КЭ с вертикальной штриховкой, $h_{90MKЭ} = 2,20$ м). Это хорошо видно, например, на расчетной схеме с уровнями значений средней относительной деформации ε , рис. 7. Линии скольжения с $k_{st\ min} = 0,98$ проходят рядом с границей, разделяющей зоны со значениями $\varepsilon \leq 0$ и $\varepsilon > 0$. Если вывести аналогичный график $u_x - u_y$ для узла подножия выемки, то он будет без гистерезиса.

Для КЭ, расположенных под трещинами рядом с линией скольжения, влево и вправо от неё, графики траекторий нагружения в пространстве $\sigma_i - \sigma$ имеют разный вид. Несмотря на противоположно направленные конечные участки траекторий в пространстве $\sigma_i - \varepsilon_i$ в этих местах реализуется сдвиг, рис. 8.

Рисунок 6. Результаты авторских расчетов (выемка – геосреда) – графики зависимости $u_x - u_y$ (м-м): а) в зоне центров вихрей для КЭ слева от линии скольжения; б) то же для КЭ справа от линии скольжения

Представляют интерес графики в узлах на бровке борта выемки и на левой вертикальной границе расчетной схемы в уровне её подножия, рис. 9. Первый график слева имеет гистерезисный вид, как и графики на рис. 6.

Рисунок 7. Результаты авторских расчетов после 14-го этапа экскавации ($d_u = 15,4$ м, $1:m = 1:1$) – зоны «пластичности» и уровни значений шарового инварианта тензора относительных деформаций ε : $\varepsilon \leq 0$ – красная или более темная окраска; $\varepsilon > 0$ – зеленая или более светлая окраска

Эти графики подтверждают предположение о движении верхней и нижней частей возникающего оползневого тела в разные стороны. График на рис. 9б может служить ещё одним критерием окончания процесса образования оползневого тела. При достижении грунтом борта предельного состояния по устойчивости горизонтальные напряжения в этом узле становятся постоянными: $\sigma_{xx} \approx \text{const}$. Массив грунта образовавшегося оползневого тела и уже практически отделившегося от вмещающего его массива грунта не влияет на его напряженное состояние.

Рисунок 8. Результаты авторских расчетов (выемка – геосреда) – графики траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} (МПа) и относительных деформаций ε_{ij} для КЭ: а) расположенных слева от линии скольжения; б) то же справа

Рисунок 9. Результаты авторских расчетов (выемка – геосреда) – графики зависимости $u_x - u_y$ (м - м) и $\sigma_{xx} - \sigma_{yy}$ (МПа - МПа) для узлов: а) на бровке борта; б) на левой вертикальной границе в уровне подножия

Еще раз остановимся на образовании оползневых тел в бортах выемки. Для демонстрации возможностей программы, на рис. 10 представлены результаты исследования НДС и устойчивости бортов выемок ($d_u = 99,4$ м, $1:m = 1:2$), и ($d_u = 11,0$ м, $1:m = 1:0,5$), имеющих неодинаковые геометрические размеры и одинаковые значения параметров деформируемости и прочности. При моделировании экскавации находилась предельная глубина выемки d_u при $k_{st \min}$. Контуры призм оползания хорошо проявляют себя при выводе на экран компьютера уровней значений средней относительной объемной деформации ε .

Вывод на экран расчетной схемы в двух цветах значений этой величины ($\varepsilon \leq 0$ – красная или более темная окраска; $\varepsilon > 0$ – зеленая или более светлая окраска) фиксирует контуры

6. В крутых бортах выемки не образуется нижний отросток зон «пластичности», см. рис. 10б, а в более пологих образуется, см. рис. 7 и 10а.
7. Графики, в виде траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензоров σ_{ij} и ε_{ij} , в КЭ, расположенных на линии скольжения с $k_{st\ min}$, имеют разный вид: на большей её части имеют вид рис. 4 и 8; в КЭ, расположенных чуть выше, в местах движения центров вращения, имеют вид рис. 5б; в КЭ верхней части линии скольжения вид рис. 5а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов / Пер. с англ. В.С. Забавина; Под ред. В.Г. Мельника. М., Стройиздат, 1988. 240 с.
2. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York (1943), 510 pp.
3. Zienkiewicz, O.C. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [Text] / O.C. Zienkiewicz, C. Humpheson, R.W. Lewis // Geotechnique. 1975. No. 4, 671–689.
4. Finn W.D.L. Static and Dinamic Behavior of an Earth Dam. Canadien Geotechnical Journal, 1967, Vol.4, No.1, pp. 28–44.
5. Duncan J.M. and Dunlop P. Development of Failure around Excavated Slopes. J. of Soil Mehanics and Foundation Division, ASCE, Vol.96, No.SM2, 1970, pp. 471–494.
6. Garbulewski, K. Analysis of embankment on an organic soil. VII Danube-European conference on soil mechanics and foundation engineering. USSR, Kishinev, September, Vol. III/5. pp. 20–25.
7. Desai C.S. Some aspects of constitute models for geologic media. Third International Conference of Numerical Methods in Geomechanics / Aachen / 2–6 April 1979, pp. 299–308.
8. Зарецкий, Ю.К. Статика и динамика грунтовых плотин / Ю.К. Зарецкий, В.Н. Ломбардо. М., Энергоатомиздат, 1983. 256 с.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М., Недра, 1987. 221 с.
10. Фоменко И.К. Современные тенденции в учетах устойчивости склонов / Инженерная геология. 2012. №6. С. 44–53.
11. Федоренко Е.В. Метод оценки устойчивости путем снижения прочностных характеристик / Транспорт Российской Федерации. 2013. №6 (49). С. 24–26.
12. Горшков Н.И. Сравнительная оценка напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений (выемки и насыпи) на основе МКЭ / Н.И. Горшков, М.А. Краснов // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. №5(238). С. 4–11.
13. Горшков Н.И. Особенности оценки устойчивости грунтовых сооружений на основе расчетов МКЭ / Н.И. Горшков, М.А. Краснов // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сборник статей научно-технической конференции; СПбГАСУ. СПб., 2012. С. 93–105.
14. Федоровский В.Г. О коэффициентах запаса / В.Г. Федоровский, С.Г. Ильин // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. №2. С. 2–7.
15. Ревуженко А.Ф. Механика упруго-пластических сред и нестандартный анализ. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. 428 с.

Gorshkov Nikolay Ivanovich

Pacific national university, Khabarovsk, Russia
E-mail: Fem_soft@mail.ru

Krasnov Mikhail Aleksandrovich

Pacific national university, Khabarovsk, Russia
E-mail: Mike_mail@mail.ru

Yuan Jingwen

Pacific national university, Khabarovsk, Russia
E-mail: 444703108@qq.com

Jdanova Svetlana Mirzaxanovna

Far-Eastern state transport university, Khabarovsk, Russia
E-mail: mirzahanovna@mail.ru

Peculiarities of the stress-strain state of the “excavation – geo-environment” and “embankment – geo-environment” systems in the process of erecting them (part I)

Abstract. Excavations and embankments are the most common ground transport structures, operational reliability and durability of which is determined by the stability of their sides and slopes. The first article deals with the features of stress-strain state and changes in stability of ground transport structures (excavations) based on modeling according to the certified program of finite element method GenIDE32. At modeling the layer-by-layer excavation of homogeneous soil from excavations with finite geometrical sizes was carried out. In the excavation edge array, in the field of displacement vector u_i , appeared are poorly studied phenomena in the form of "rotation circles" or short vortices. These phenomena, discovered in model experiments (Yu.I. Soloviev, 1956), require detailed research in the future. Graphic results of the calculations performed allow one to see the appearance and development of zones of "plasticity" or limit state in the form of zones of "shift-compression", "compression-shift" and "stretching". Shift-compression zones and vice versa are shown as shaded finite elements at an angle crosswise, while stretch zones are shown as shaded vertically, horizontally and vertically, and horizontally finite elements. These zones, in the process of modeling, are drawn in the edges of the projections of a slide with vertical and horizontal cracks. The contours of the landslide prisms show themselves well when the average relative volume deformation values of ε are displayed on the screen. The display of this value in two colors defines the landslide contours in this figure. Sliding lines with the minimum value of the stability coefficient $k_{st \min}$ pass near the borders, where values of this parameter are equal to zero. In this figure, in the upper part of the array, you can see the places where vertical cracks are formed. The analysis also uses graphs of stress-strain state trajectories in the space of stress tensor invariants σ_{ij} and relative deformations ε_{ij} in significant nodes and finite elements, located, including, in places of sliding lines with $k_{st \min}$. They make it possible to see from the volume and shape deformation graphs where the system with the calculated condition is located, for example, from the condition at which the body of the landslide was formed.

Keywords: excavation; embankment; ground; geo-environment; stress-strain state (SSS); stability; sliding surface; finite element method (FEM)

REFERENCES

1. Khuan Ya.Kh. (1988). *Earth slope stability*. [Russ. ed.: Ustoychivost' zemlyanykh otkosov. Authorized transl. by V.S. Zabavin; Ed. by V.G. Mel'nik. Moscow: Stroyizdat, p. 240].
2. Terzaghi K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. New York: Wiley, p. 510.
3. Zienkiewicz O.C., Humpheson C., Lewis R.W. (1975). Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics. *Geotechnique*, 4, pp. 671–689.
4. Finn W.D.L. (1967). Static and Dinamic Behavior of an Earth Dam. *Canadien Geotechnical Journal*, 1(4), pp. 28–44.
5. Duncan J.M., Dunlop P. (1970). Development of Failure around Excavated Slopes. *J. of Soil Mehanics and Foundation Division, ASCE*, SM2(96), pp. 471–494.
6. Garbulewski K. (n.d.). *Analysis of embankment on an organic soil*. USSR, Kishinev, pp. 20–25.
7. Desai C.S. (1979). *Some aspects of constitute models for geologic media*. Aachen, pp. 299–308.
8. Zaretskiy Yu.K., Lombardo V.N. (1983). Statika i dinamika gruntovykh plotin. [*Statics and dynamics of soil dams.*] Moscow: Energoatomizdat, p. 256.
9. Fadeev A.B. (1987). Metod konechnykh ehlementov v geomekhanike. [*Finite Element Method in Geomechanics.*] Moscow: Bosom, p. 221.
10. Fomenko I.K. (2012). Current trends in slope stability accounting. *Engineering geology*, 6, pp. 44–53 (in Russian).
11. Fedorenko E.V. (2013). Method for assessing stability by reducing strength characteristics. *Transport of the Russian Federation*, 6(49), pp. 24–26 (in Russian).
12. Gorshkov N.I., Krasnov M.A. (2011). Comparative evaluation of the stress-strain state of soil structures (excavations and embankments) based on the FEM. *Structural mechanics and calculation of structures*, 5(238), pp. 4–11 (in Russian).
13. Gorshkov N.I., Krasnov M.A. (2012). Osobennosti otsenki ustoychivosti gruntovykh sooruzheniy na osnove raschetov MKEh. [*Features of assessing the stability of soil structures based on FEM calculations.*] Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, pp. 93–105.
14. Fedorovskiy V.G., Il'in S.G. (2015). About reserve factors. *Foundations, foundations and soil mechanics*, 2, pp. 2–7 (in Russian).
15. Revuzhenko A.F. (2000). Mekhanika uprugoplasticheskikh sred i nestandartnyy analiz. [*The mechanics of elastic-plastic media and non-standard analysis.*] Novosibirsk: Novosibirsk University Press, p. 428.