

УДК 69.035.2

Маций Сергей Иосифович

ООО «НТЦ ГеоПроект»

Россия, Краснодар¹

Директор

Доктор технических наук, профессор

E-Mail: matsiy@mail.ru

Лейер Дарья Валерьевна

ООО «НТЦ ГеоПроект»

Россия, Краснодар

Ведущий инженер

Магистр

E-Mail: dasha_leyer@mail.ru

Безуглова Екатерина Вячеславовна

ООО «НТЦ ГеоПроект»

Россия, Краснодар

Главный специалист

Доцент, кандидат технических наук

E-Mail: nebo7@list.ru

Деревенец Филипп Николаевич

ООО «НТЦ ГеоПроект»

Россия, Краснодар

Главный специалист

Доцент, кандидат технических наук

E-Mail: derevenets.fn@yandex.ru

Исследование взаимодействия глинистых грунтов с противооползневыми сооружениями инженерной защиты опор эстакад

¹ 350089, г. Краснодар, б-р Клары Лучко, 6, офис 509

Аннотация. Строительство автомобильных и железных дорог в оползнеопасных районах нередко осуществляется в эстакадном варианте. Для точечной защиты опор эстакад от оползневых деформаций требуется разработка эффективных свайных удерживающих конструкций. С этой целью выполнены исследования взаимодействия оползневого грунта со сваями однорядного сооружения. Рассмотрено поведение глинисто-пластичных и обломочно-глинистых грунтов. Предложена расчетная схема, учитывающая постепенное увеличение оползневого давления. Моделирование выполнено с помощью метода конечных элементов в программном комплексе Plaxis.

Анализ совместной работы свайного сооружения точечной защиты опор эстакад и оползневого грунта показал стадийность изменения напряженно-деформированного состояния массива. По мере возрастания оползневой нагрузки, происходят пластические деформации грунта и разрушение его структуры, сопровождающиеся «обтеканием» свайного сооружения. Получены графические зависимости: 1) предельного давления грунта от его физико-механических свойств и шага свай; 2) перемещений грунта от шага свай и оползневой нагрузки. Установлена величина критического давления на сооружение, после чего происходит развитие пластического течения грунта.

Результаты численного моделирования сопоставлены с лабораторными исследованиями, а также с известными решениями. Предлагаемая расчетная схема использована при проектировании мероприятий инженерной защиты опор эстакады № 3 в городе Сочи.

Ключевые слова: оползень; давление обтекания; свая; опоры эстакад; шаг свай; деформации грунта; противооползневое сооружение; расчетная схема; склон; оползневое давление.

Расчетная схема исследования

В настоящее время существует необходимость строительства транспортных эстакад на оползневых склонах. Для проектирования точечной защиты опор эстакад требуется выполнение исследований и расчетов по определению оптимального шага свай однорядного сооружения (рис. 1). Для эффективной защиты опор эстакад от деформаций, а также рационального расположения свайных элементов противооползневого сооружения проведен ряд исследований. Исследование взаимодействия глинистых оползневых грунтов со сваями однорядного сооружения точечной защиты опор эстакад включает в себя ряд задач:

- выявление закономерностей распределения оползневого давления как вокруг каждой сваи, так и между сваями в зависимости от шага элементов;
- анализ особенностей процесса деформирования грунтов при взаимодействии с защитными сооружениями;
- изучение образования пластических деформаций грунтов вокруг сооружений при точечной защите опор;
- определение наиболее эффективного шага свай в противооползневом сооружении при «обтекании» грунтом.



*Рис. 1. Оползневой склон с устроенными фундаментами опор эстакад
(разработано автором)*

Параметры сооружения и прочностные характеристики исследуемых грунтов приведены в таблице 1. Физико-механические свойства для грунтов №1 и №2 приняты согласно региональным исследованиям инженерно-геологических условий Черноморского побережья [6], в то время как для грунта №3 – в соответствии с данными [2]. Нагружение в каждом численном эксперименте проводилось ступенями (автоматическое пошаговое нагружение) до образования пластического течения грунта, вплоть до разрушения грунтового тела вокруг сооружения.

Совместная работа противооползневого сооружения и грунта напрямую зависит от расстояния между свайными элементами. В связи с этим проведено исследование изменения полей относительных деформаций, продольных и поперечных перемещений грунта, а также его

напряженного состояния и пластических деформаций в зависимости от шага свай и физико-механических свойств грунтов.

Таблица 1

Параметры сооружения и прочностные характеристики грунтов (разработано автором)

Общие параметры сооружения	
диаметр свай D , м	1,0
относительный шаг свай в ряду L/D	2,0–6,0
Грунт №1 (глинисто-пластичные породы)	
удельное сцепление c , кПа	25,0
угол внутреннего трения φ , град.	4,0
модуль деформации E , МПа	2,5
Грунт №2 (обломочно-глинистые породы)	
удельное сцепление c , кПа	40,0
угол внутреннего трения φ , град.	25,0
модуль деформации E , МПа	25,0
Грунт №3 (текучие глины)	
удельное сцепление c , кПа	8,0
угол внутреннего трения φ , град.	4,0
модуль деформации E , МПа	10,0

Для решения поставленных задач в упруго-пластической постановке разработана расчетная конечно-элементная модель [5], реализованная в программе *Plaxis*. Рассмотрена плоская задача – противооползневое сооружение, состоящее из трех отдельно стоящих свай (рис. 2). В направлении оси сооружения, расчетная модель ограничена осями симметрии в створе смежных в ряду свай. Граничные условия предусматривают возможность перемещений грунта в направлении оползневого давления с учетом боковых смещений, то есть «обтекания» сооружения грунтом. Закрепление свай в расчетной схеме принято жестким, с возможностью проскальзывания и отрыва грунта. Основанием этому служит тот факт, что величины смещений пород значительно превышают деформации свайного сооружения под действием оползневого давления.

Для минимизации влияния границ расчетной области на результаты вычислений, размеры расчетной модели как в продольном, так и в поперечном направлениях относительно оползневых смещений вдоль оси сооружения приняты равными $10,0 \cdot D$ от оси крайней сваи. Расстояние до границ расчетной схемы получено с помощью анализа полей продольных перемещений грунта при малых нагрузках при шаге свай $L=2,0 \cdot D$ и $L=6,0 \cdot D$. Для исследования давления обтекания оползневого грунта защитного сооружения опор эстакад на расчетной схеме выделены характерные точки *A* и *B*, расположенные по оси сооружения на расстоянии $0,5 \cdot L$ от центров крайних свай. Расстояние от свай до исследуемых точек *A* и *B* определено на основе результатов анализа полей перемещений и пластических деформаций грунта.

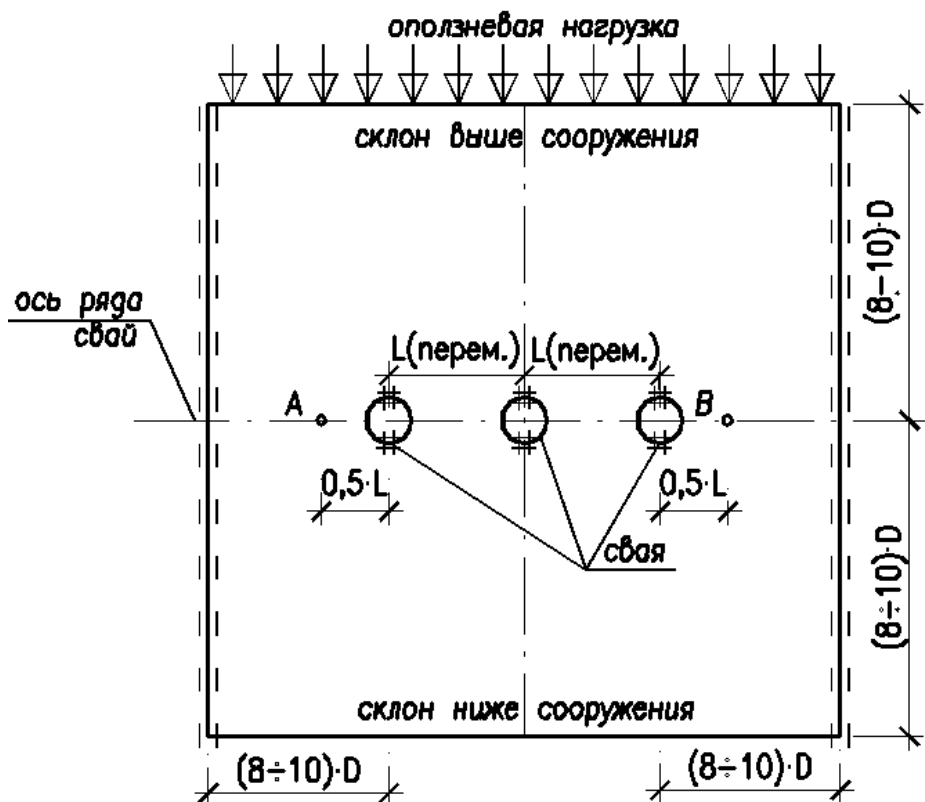


Рис. 2. Расчетная схема, моделирующая обтекание грунта вокруг сооружения с оптимизированными размерами (разработано автором)

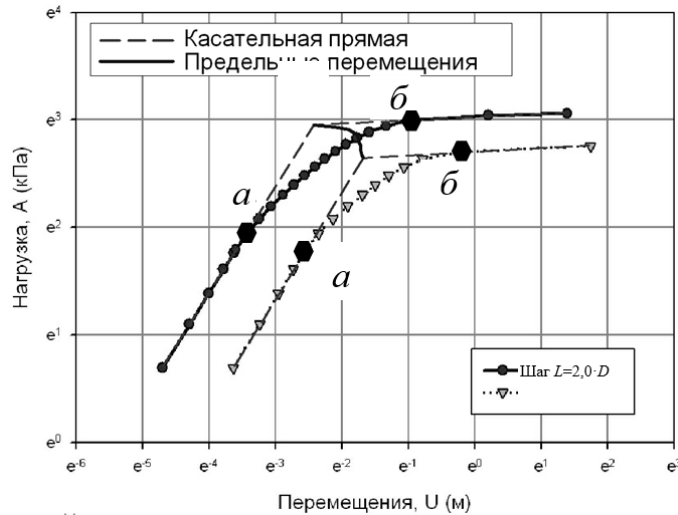
Исследование зон пластических деформаций грунтов при оползневых смещениях

Анализ напряженно-деформированного состояния грунта выполнен для трех отдельных пород, отличающихся прочностными свойствами – от текучих глин до прочных. По результатам исследований получены графические зависимости:

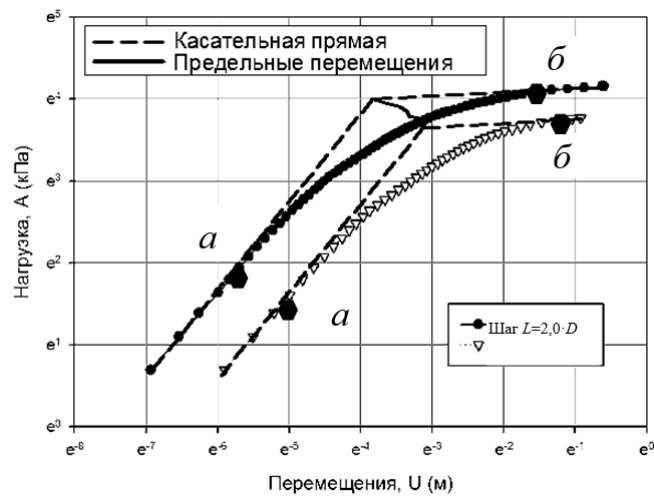
- деформаций грунта от шага свай и прикладываемой нагрузки при равномерном загрузении (рис. 3);
- предельного оползневого давления грунта от шага свай (рис. 3).

Точки *a* и *б* получены графическим способом (рис. 3), путем проведения касательных прямых, построенных на прямолинейных участках графика. По точкам пересечения касательных друг с другом определяется зависимость предельных перемещений от оползневой нагрузки.

3.1)



3.2)



3.3)

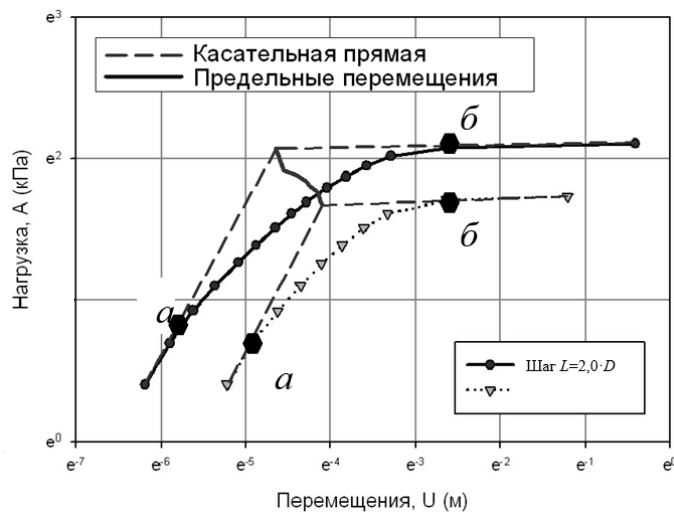


Рис. 3. Зависимость перемещений грунта №1 (3.1), №2 (3.2) и №3 (3.3) от шага свай и оползневой нагрузки (точка *a* соответствует первым значительным деформациям породы; точка *б* – развитию пластического течения грунта) (разработано автором)

В соответствии с графиками изменения перемещений грунтов в зависимости от оползневого давления выделяется три наиболее характерные стадии развития деформаций:

- первая – появление первых значительных деформаций породы (соответствует участку от начала графика до точки *a*);
- вторая – образование предельных максимальных сдвигающих усилий (соответствует участку от точки *a* до точки *b*);
- третья – развитие пластических деформаций грунта и разрушение его структуры (соответствует участку от точки *b* до конца графика).

При исследовании влияния «обтекания» сооружения при точечной защите опор эстакад определена зависимость предельного оползневого давления от шага свай и физико-механических свойств грунтов (рис. 4). В результате получено следующее: при увеличении шага свай в ряду уменьшается предельное оползневое давление, воспринимаемое свайно-грунтовой системой. Кроме того, при увеличении физико-механических свойств грунтов сооружение воспринимает большее давление.

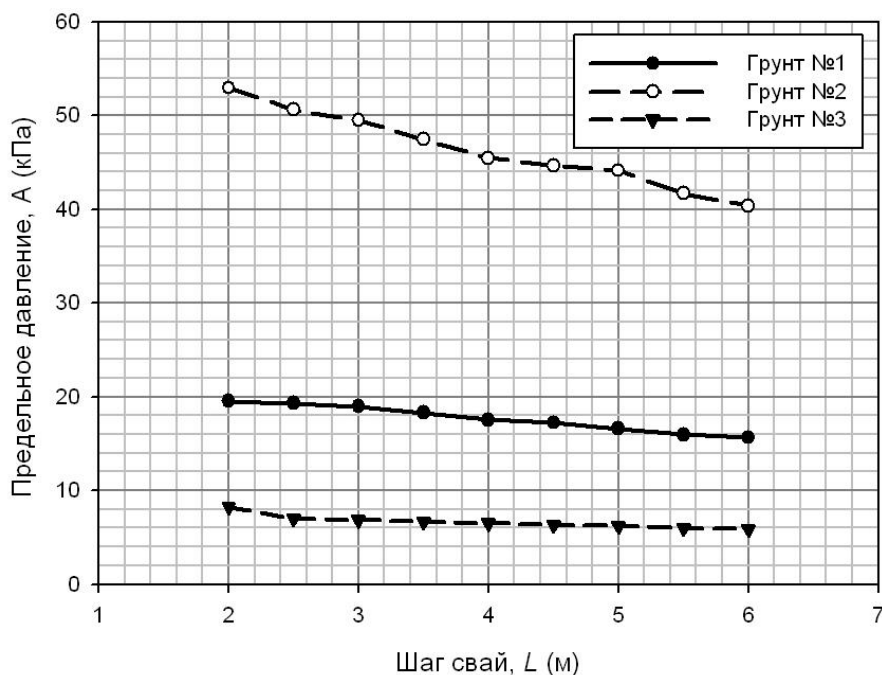


Рис. 4. Зависимость предельного оползневого давления от шага свай и физико-механических свойств грунтов (разработано автором)

При незначительных оползневых нагрузках грунт около свайного пространства на удалении $\approx 3,0 \cdot D$ от свай выше сооружения начинает уплотняться практически равномерно по всему фронту конструкции (рис. 5, 6). Такой результат достигается за счет так называемого «арочного эффекта», благодаря которому грунт не продавливается между сваями. Таким образом, создается практически сплошная свайно-грунтовую конструкцию переменной жесткости, работающая как отдельно стоящий элемент. Характер деформирования грунта соответствует первой и второй стадиям развития деформаций. Полученные результаты соответствуют лабораторным данным, представленным во многих работах [1–3].

На стадии нагружения напряжения, приходящиеся на крайние и среднюю сваи, различны. За счет «арочного эффекта» и «клина» уплотненного ядра давление в средней части сооружения частично воспринимается грунтом [4], происходит «обтекание» конструкции. Таким образом, давление на крайних сваях больше, чем на средней. В процессе увеличения оползневой нагрузки развивается продавливание грунта между сваями, что приводит к уравниванию усилий в них. Напряжения становятся практически одинаковыми как на боковых поверхностях в межсвайном пространстве, так и по внешним сторонам сооружения. Соответственно, на последующих этапах нагружения (до достижения точки b) давление на сваи распределяется практически равномерно. На стадии образования пластических деформаций грунта и разрушения его структуры происходит как продавливание грунта между сваями, так и «обтекание» сооружения. Каждая свая начинает работать как отдельно стоящий элемент, что недопустимо при точечной защите объектов. Соответственно, при проектировании защитных сооружений опор эстакад необходимо определить оптимальный шаг элементов, при котором все сваи были бы нагружены равномерно, и при этом, не происходило бы продавливания грунта.

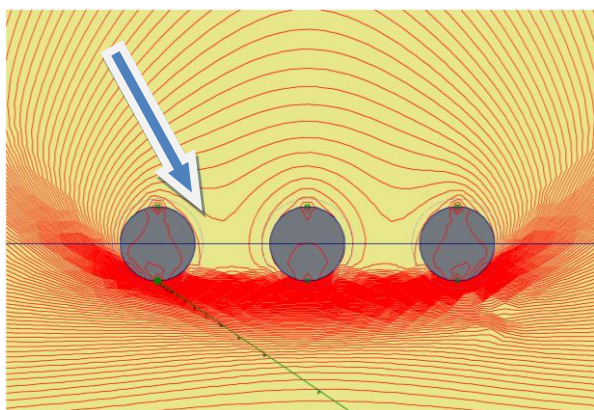


Рис. 5. Поля изолиний общих перемещений грунта. Начальная стадия нагружения. Шаг свай $L=2,0 \cdot D$ (разработано автором)

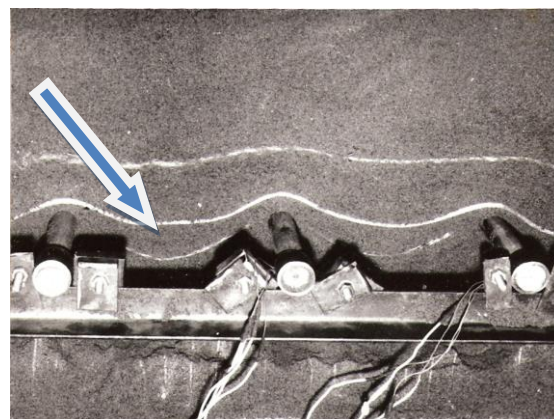


Рис. 6. Деформации оползневой грунта в толще оползня по данным лабораторных испытаний [2]

При исследовании общих перемещений оползневой массы с учетом изменения шага свай в ряду при физико-механических свойствах грунтов №1–3 приведены только самые критические геометрические параметры, то есть шаг свай $L = 2,0 \cdot D$ и шаг $L = 6,0 \cdot D$ (рис. 3). Характер общих перемещений при исследовании грунта №1 и №3 аналогичен, изменяется только относительная величина смещений пород грунта относительно сооружения и предельное оползневое давление. В то время, как при исследовании грунта №2 характер деформаций оползневой массы отличается увеличением общих перемещений в области свай, что говорит об индивидуальной работе свай как отдельных элементов. Отличия областей деформаций получаются за счет различных прочностных характеристик, а именно угла внутреннего трения φ и сцепления грунта c .

Таким образом, с изменением шага свай изменяется характер взаимодействия оползневой массы с удерживающим сооружением. При шаге свай $L = 2,0 \cdot D$ общие перемещения и зоны пластических деформаций подтверждают предположение о совместной работе свайно-грунтовой системы. При этом, развивается «обтекание» грунта вокруг

сооружения. При шаге свай $L = 6,0 \cdot D$ общие перемещения и зоны пластических деформаций разрываются и приобретают локальный характер, преимущественно на фронтальной поверхности свай относительной приложенной оползневой нагрузки. Независимо от физико-механических свойств грунтов при большом шаге свай давление «обтекания» вокруг сооружения сопоставимо с давлением продавливания между сваями, в связи с тем, что они работают как отдельно стоящие элементы. Согласно проведенным исследованиям выявлен общий вид зависимости перемещений и оползневого давления от шага свай:

$$U_{пред} = a \cdot e \cdot (b \cdot L), \quad (1)$$

$$P_{пред} = c \cdot e \cdot (-d \cdot L), \quad (2)$$

где L – расстояние между сваями в ряду, м;
 a, b, c, d – коэффициенты уравнений, определяемые в зависимости от прочностных свойств грунтов;
 $U_{пред}$ – предельно допустимые перемещения грунта;
 $P_{пред}$ – предельно допустимое оползневое давление;
 $e \approx 2,71$.

Результаты исследований конечно-элементного анализа сопоставлены с известными решениями [2, 5, 7, 8, 9, 10] при величине угла внутреннего трения $\varphi = 0^\circ$. В итоге, аналогично с исследованиями известных работ (рис. 7) получена экспоненциальная кривая.

Полученная кривая предельного оползневого давления по методике [5] при определенном шаге свай приобретает пологий характер и практически горизонтальный наклон. Предельное оползневое давление из условия непродавливания становится постоянным и соответствует, по всей видимости, давлению «обтекания» и локальному характеру работы свайных упоров. Пологий вид кривой по предлагаемой методике аналогичен исследованиям [5], что говорит о хорошей сходимости результатов численных расчетов. Кроме того, выявлен график с наибольшим оползневым давлением, приходящимся на сваи – зависимость по методике [7]. Разница предельных оползневых давлений при сравнении с предлагаемой методикой получена в связи с различными расчетными схемами. В первом случае рассмотрено бесконечное линейное свайное сооружение, расположенное перпендикулярно приложенной нагрузке, с возможностью продавливания грунта между сваями. В предлагаемой методике исследована модель с точечно расположенным сооружением, с возможностью «обтекания» грунтом и продавливанием между сваями.

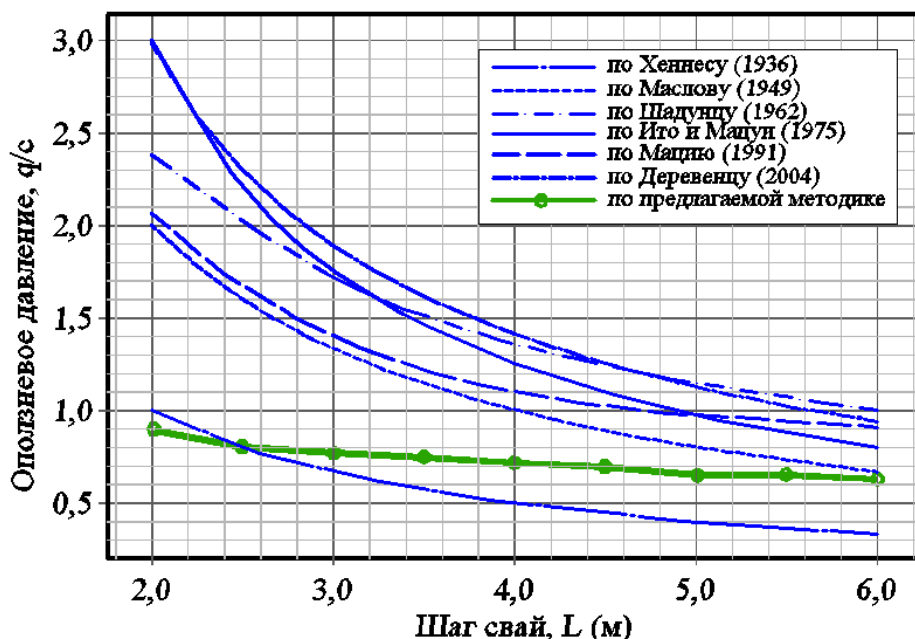


Рис. 7. График зависимости отношения критического оползневое давления грунта q к сцеплению s от шага свай при величине угла внутреннего трения $\phi = 0^\circ$ (разработано автором)

Таким образом, в результате сопоставления предлагаемых данных с известными работами подтверждена корректность выбранной расчетной схемы и соответственно – получаемых численным расчетом данных относительно напряженно-деформированного состояния грунтов околоосвайного пространства. Результаты исследований взаимодействия грунта с удерживающим сооружением с учетом шага свай были использованы при проектировании мероприятий инженерной защиты опор эстакады №3 на объекте: «Дублер Курортного проспекта от км 172 федеральной автодороги М-27 Джубга – Сочи (р. Псахе) до начала обхода г. Сочи ПК 0 (р. Агура) с реконструкцией участка автомобильной дороги от ул. Земляничная до Курортного проспекта, Краснодарский Край, (I очередь от р. Агура до ул. Земляничной)». В результате внедрения предложенной методики были запроектированы экономичные и надежные свайные сооружения (рис. 8).



Рис. 8. Оползневой склон с опорами эстакады и противооползевыми сооружениями (разработано автором)

Выводы

В процессе исследования характера взаимодействия оползневых грунтов с удерживающими сооружениями для защиты опор эстакад выявлено следующее:

1. При «обтекании» грунтом сооружения существует зона влияния, в пределах которой происходят процессы деформирования и удержания оползневых масс, которые определяются диаметром удерживающих элементов и составляют $(8\div 10)\cdot D$.

2. В процессе деформирования грунта под действием возрастающей оползневой нагрузки при «обтекании» сооружения и продавливания между сваями наблюдаются следующие стадии изменения напряженно-деформированного состояния массива:

- первых значительных деформаций породы;
- предельных максимальных сдвигающих усилий;
- пластических деформаций грунта и разрушения его структуры.

3. Удержание грунта наблюдается в пределах зон влияния смежных свай, что связано с «арочным эффектом», за границами сооружения происходит свободное смещение грунта – «обтекание».

4. При шаге свай в ряду $2,0\cdot D$ сооружение работает как единая свайно-грунтовая система, а с увеличением шага до $6,0\cdot D$ – сваи работают как отдельно стоящие элементы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции. М: Стройиздат, 1979. 81 с.
2. Маций С.И. Взаимодействие свайных рядов с грунтом оползней. // Автореферат диссертации. СПб., 1991.
3. Недря Г.Д. Фундаменты, обтекаемые оползневыми массами // Автореферат диссертации. Киев, 1988.
4. Распределение усилий между рядами свай противооползневой конструкции / Л.К. Гинзбург, В.Е. Коваль, В.Б. Лапкин, В.С. Васковская // Основания, фундаменты и механика грунтов. М.: Стройиздат, 1990. №2, с. 7-11.
5. Маций, С. И. Применение метода конечных элементов для исследования взаимодействия грунтов оползня со сваями / С. И. Маций, Ф. Н. Деревенец // Основания, фундаменты и механика грунтов. – М.: Стройиздат, 2005. – № 4. – с. 8-12.
6. Количественная оценка сложности инженерно-геологических условий Черноморского побережья Кавказа // Методические рекомендации// В. И. Клименко, В. Ф. Безруков// Адлерская гидрогеологическая лаборатория ПНИИИС Госстроя СССР// Сочи, 1978.
7. Деревенец Ф. Н. Исследование взаимодействия оползневых грунтов со сваями удерживающих сооружений / Ф. Н. Деревенец, С. И. Маций // Материалы VI регион. конф. молодых ученых. – Краснодар, 2004. – С. 245-247.
8. Лapidус Л. С. Укрепление откосов слабых насыпей сваями / Л. С. Лapidус, К. Ш. Шадунц // Вопросы геотехники. Труды ДИИГа. Сб. 5. – Днепропетровск: 1962. – С. 48-55.
9. Ito T. Methods to estimate lateral force action on stabilizing piles / T. Ito, T. Matsui // Soils and foundations. – 1975. – 15. – №4. – pp. 43–59.
10. Шадунц К. Ш. Оползни-потоки / К. Ш. Шадунц. – М.: Недра, 1983. – 120 с.

Рецензент: Заместитель Председателя Поволжского отделения Российской академии транспорта, академик РАТ, доктор технических наук, профессор Овчинников Игорь Георгиевич.

Matsiy Sergey

“GeoProyekt” LLC scientific and technical centre
Russia, Krasnodar
E-Mail: matsiy@mail.ru

Leyer Darya

“GeoProyekt” LLC scientific and technical centre
Russia, Krasnodar
E-Mail: dasha_leyer@mail.ru

Bezuglova Ekaterina

“GeoProyekt” LLC scientific and technical centre
Russia, Krasnodar
E-Mail: nebo7@list.ru

Derevenets Philipp

“GeoProyekt” LLC scientific and technical centre
Russia, Krasnodar
E-Mail: derevenets.fn@yandex.ru

Research of interaction between clay soils and landslide protection structures for trestle bents

Abstract. The construction of roads and the railways in landslide areas is quite often being carried out as a trestle. Development of effective protecting structures, made out of piles, is required for pinpoint protection of trestle bents against landslide deformations. Researches of interaction between landslide soil and piles of a single-row construction were executed for this purpose. The behavior of clay - plastic and detrital-clay soils was examined. Calculation scheme, which considered gradual increase in landslide pressure, was offered. Modeling was executed by means of a final elements method using Plaxis program complex.

The analysis of combined action of pinpoint protection pile construction for trestle bents and landslide soil has showed stages of change in the stress strain state of the soil mass. In process of landslide load increase, plastic deformations are taking place and the destruction of soil structure which is accompanied by "the flow" of a pile construction. Graphical dependences were obtained: 1) extreme pressure for soil from its geophysical properties and pile space; 2) soil movements from pile space and landslide load. The value of critical pressure upon a construction leading to development of a plastic flow of soil was established.

Numerical modeling results were compared to laboratory researches, and also to well-known engineering decisions. The offered calculation scheme was used for design of engineering protection measures of trestle bent No. 3 in the city of Sochi.

Keywords: landslide; flow pressure; pile; trestle bent; pile space; soil deformations; landslide protective structure; calculation scheme; slope; landslide pressure.

REFERENCES

1. Ginzburg L.K. Protivoopolznevye uderzhivajushhie konstrukcii. M: Strojizdat, 1979. 81 s.
2. Macij S.I. Vzaimodejstvie svajnyh rjadov s gruntom opolznej. // Avtoreferat dissertacii. SPb., 1991.
3. Nedrja G.D. Fundamenty, obtekaemye opolznevymi massami // Avtoreferat dissertacii. Kiev, 1988.
4. Raspredelenie usilij mezhdru rjadami svaj protivopolznevoj konstrukcii / L.K. Ginzburg, V.E. Koval', V.B. Lapkin, V.S. Vaskovskaja // Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov. M.: Strojizdat, 1990. №2, s. 7-11.
5. Macij, S. I. Primenenie metoda konechnyh jelementov dlja issledovaniya vzaimodejstvija gruntov opolznja so svajami / S. I. Macij, F. N. Derevenec // Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov. – M.: Strojizdat, 2005. – № 4. – с. 8-12.
6. Kolichestvennaja ocenka slozhnosti inzhenerno-geologicheskikh uslovij Chernomorskogo poberezh'ja Kavkaza // Metodicheskie rekomendacii// V. I. Klimenko, V. F. Bezrukov// Adlerskaja gidrogeologicheskaja laboratorija PNIIS Gosstroja SSSR// Sochi, 1978.
7. Derevenec F. N. Issledovanie vzaimodejstvija opolznevnyh gruntov so svajami uderzhivajushhih sooruzhenij / F. N. Derevenec, S. I. Macij // Materialy VI region. konf. molodyh uchenyh. – Krasnodar, 2004. – S. 245-247.
8. Lapidus L. S. Ukreplenie otkosov slabyh nasypej svajami / L. S. Lapidus, K. Sh. Shadunc // Voprosy geotekhniki. Trudy DIIGa. Sb. 5. – Dnepropetrovsk: 1962. – S. 48-55.
9. Ito T. Methods to estimate lateral force action on stabilizing piles / T. Ito, T. Matsui // Soils and foundations. – 1975. – 15. – №4. – pp. 43–59.
10. Shadunc K. Sh. Opolzni-potoki / K. Sh. Shadunc. – M.: Nedra, 1983. – 120 s.