

СТАБИЛИЗАЦИЯ ОПОЛЗНЕЙ АРК, УКРАИНА, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВАЙ-ШПОНОК

Трофимчук А.Н., Клименков О.А., Берчун Я.О.
Институт телекоммуникаций и глобального экономического
пространства НАН Украины
г. Киев, Украина

Калюх Ю.И., Дунин В.А., Хавкин К.А.
ГП «Научно-исследовательский институт строительных конструкций»
г. Киев, Украина

Сильченко К.В.
ОАО «НИИ «КрымГИИНТИЗ»»
г. Симферополь

Калюх Т.Ю.
ОАО «Нафтогаз Украины» Дочернее предприятие "Научно-
исследовательский институт нефтегазовой промышленности"
г. Киев, Украина

АНОТАЦІЯ: Виконано експериментальні дослідження палі-шпонки в лотку. Отримано розподіли зсувного тиску в залежності від її довжини.

АННОТАЦИЯ: Выполнены экспериментальные исследования свай-шпонки в лотке. Получены распределения оползневое давления в зависимости от её длины.

ABSTRACT: Experimental studies of the short pile in the tray were investigated. Distribution of landslide pressure depending from its length was obtained.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: свая-шпонка, оползень, эксперимент, погрешность, подобие.

ВСТУПЛЕНИЕ

Оползни представляют собой серьезную угрозу жизни людей, объектам инфраструктуры и окружающей среде во многих регионах мира. В течение последнего десятилетия (с 2000 по 2009) стихийные бедствия повредили и разрушили около одного миллиона объектов, что непосредственно коснулось почти 2,5 млрд. населения во всем мире. Ежегодно в Европе случается около 20 крупных оползней, что по частоте проявления значительно выше числа наводнений, землетрясений и ураганов на европейском континенте. (Lacasse S., 2013 [1]). Изучением оползневых проявлений и нарушений занимались известные зарубежные ученые: Sassa K. et al., 2005; Lollino, G. et al., 2014; Lacasse S., 2013; Baum, R. et al., 2005; Reid M. and LaHusen R., 1998; etc. [2-5]. Одними из эффективных средств смягчения оползневой опасности являются противооползневые сооружения, которые широко применяются в мировой практике (Highland L. and Bobrowsky P., 2008 [6]), исследованию отдельных аспектов которых (свай-шпонок) и посвящена представленная статья.

Изучением работы противооползневых конструкций на моделях занимались украинские ученые: Абросимов В. Г., Гинзбург Л. К., Метелюк А. С., Назарова Н. В. и др. [7 - 11]. Полученные ими результаты хорошо согласуются с работой реальных противооползневых сооружений. Преимуществами модельных испытаний является меньшая стоимость и материалоемкость экспериментов, чем при натуральных испытаниях, высокая воспроизводимость опытов и возможность создания условий, максимально соответствующих изучаемому процессу с минимальным влиянием второстепенных и случайных факторов.

В специфических условиях Крыма (Украина) забивные сваи, как правило, не используются из-за повсеместного распространения почв с большим количеством скальных включений и твердых пород, представленных аргиллитами и алевролитами с прослойками песчаника [12, 13]. Наиболее широкое применение получили буронабивные сваи, которые с 1968 г. сооружаются на оползневых склонах Крыма и позволяют успешно закреплять оползни, мощность которых иногда достигает до 15...20 м [12, 13]. Одним из рациональных решений для удерживающих противооползневых сооружений считается применение свай-шпонок. Они представляют собой укороченные буронабивные сваи, которые углубляются ниже поверхности скольжения на расчетную величину и выводятся выше нее на расстояние, обеспечивающее перекрытие смещающихся оползневых пород.

В ранее проведенных экспериментах в работах [9, 11] исследовалась работа свай или продольных удерживающих стен полной длины равной оползневой толще. В работе [10] выполнялись экспериментальные исследования на моделях, целью которых являлось определение сопротивления

свай по прочности грунта боковому смещению оползневой массы. В работе [11] экспериментально была установлена качественная картина взаимодействия грунтового массива с удерживающей конструкцией в виде продольных стен в объемном лотке. В работе [11] удалось установить для продольных удерживающих стен явление арочного эффекта и определить долю сил трения по боковой поверхности стен в суммарном сопротивлении грунтового массива сдвигу. В работе [7] экспериментально на моделях изучено: напряженно-деформированное состояние в поперечных сечениях изгибаемых буронабивных свай, влияние глинистой пленки на прочность, ширину раскрытия трещин, жесткость изгибаемых буронабивных свай с равномерно распределенным и сосредоточенным армированием. В тоже время, в описанных выше экспериментальных исследованиях Гинзбурга Л. К., Назарова Н. В., Метелюка А. С. и других авторов [7, 9, 11] напряженно-деформированное состояние удерживающих элементов длиной меньше мощности сдвигаемого блока, моделирующего оползневую толщу, не исследовалось.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для выявления качественной и количественной картины распределения оползневого давления по длине сваи-шпонки выше зоны заделки была разработана следующая экспериментальная установка. В качестве допущения при проведении экспериментальных исследований принимается: оползневые массы однородны и смещаются по поверхности скольжения, которая предопределена геологическим строением; свая-шпонка жестко заземлена в несмещаемых грунтах. Для разработки методики экспериментов были определены соответствующие π -переменные для нашего случая и разработана методика экспериментальных исследований.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ П-ПЕРЕМЕННЫХ КОНСОЛЬНО-ЗАЩЕМЛЕННОЙ СВАИ-ШПОНКИ ПРИ ИЗГИБЕ

Предположим, что материал обладает линейно-упругими свойствами, и влияние собственного веса конструкции не учитывается. При этих условиях с помощью анализа размерностей можно получить:

$$\frac{\sigma L^2}{P} = \Phi\left(\frac{x_k}{L}, \frac{l_j}{L}, \frac{P_i}{P}, \frac{E L^2}{P}, \nu\right)$$

Таким образом, от 7-ми переменных $L, x_k, l_j, P, P_i, E, \nu$ мы перешли к 5-ти π -переменным:

$$\pi_1 = \frac{x_k}{L}; \pi_2 = \frac{l_j}{L}; \pi_3 = \frac{P_i}{P}; \pi_4 = \frac{EL^2}{P}; \pi_5 = \nu$$

Модели, которые пригодны для определения отдельных переменных или класса переменных, но которые нельзя использовать для определения других величин, называются **адекватными моделями** в отличие от более общего класса **точных моделей** [14]. Точные модели обязательно должны быть геометрически подобны натуре, в то время как для адекватных моделей это условие не является обязательным. При моделировании часто возникают трудности в связи с невозможностью удовлетворить всем его условиям, которые считаются важными. В этом случае применяют **приближенные модели**, часто в связи с тем, что нельзя подобрать для модели соответствующий материал. Универсальной стандартной методики определения погрешностей, возникающих при использовании приближенных моделей, не существует, поэтому каждую такую модель приходится оценивать отдельно [14, 15]. Рассмотрим **адекватную модель** напряженно-деформированного состояния **сваи-шпонки** в оползневом массиве, выполненную из оргстекла, так как коэффициенты Пуассона модели (оргстекло) и природы (бетон) не совпадают. В этом случае любая компонента напряжения в точке x_k сваи-шпонки может быть выражена в виде:

$$\sigma = F(L, a, b, Q, E)$$

Здесь L – длина сваи-шпонки, a и b – характерные размеры прямоугольного сечения сваи-шпонки, Q – интенсивность бокового давления по длине сваи-шпонки, моделирующее интенсивность оползневого давления по длине на сваю-шпонку, E – модуль упругости. Применение π -теоремы к выражению (3) показывает, что для описания этой задачи необходимы три π -переменные. В случае квадратного поперечного сечения сваи-шпонки ($a = b$) количество π -переменных уменьшается до двух (π_1 и π_2):

$$\pi_1 = \frac{a}{L}; \pi_2 = \frac{EL}{Q}.$$

Таким образом, с помощью анализа размерностей для адекватной модели сваи-шпонки получены две π -переменные, что позволило провести эксперименты более экономично и эффективно. Таким образом, с учетом соблюдения описанных условий подобия была построена **адекватная модель** сваи-шпонки сечением 300×300 мм при мощности оползневых накоплений 3 м. Результирующий масштаб моделирования составил 1:10.

КОНСТРУКЦИЯ ЛОТКА И МОДЕЛИ. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И АППАРАТУРА

Для создания аналога работы сваи-шпонки в оползневом блоке была сконструирована и изготовлена экспериментальная установка (рис. 1).



б)

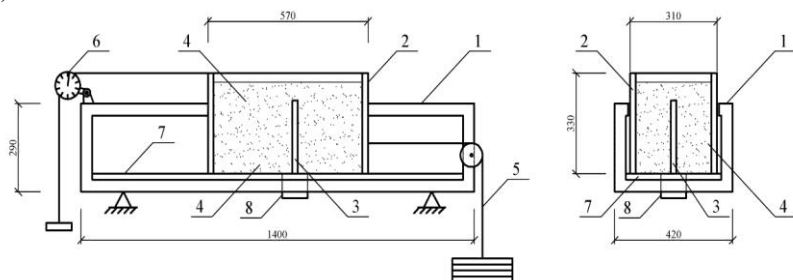


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования работы сваи-шпонки в оползневой толще: а – фото установки во время эксперимента; б – схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из следующих основных частей: стальной неподвижной удерживающей конструкции 1; подвижного бездонного лотка 2 размерами $57 \times 35 \times 33$ см, который может перемещаться по деревянному основанию 7; перемещения бездонного лотка 2 измеряются прогибомером 6; нагружения производились через грузовую подвеску 5. Тензометрическая модель 3 устанавливается в гнездо 35×35 в основании 7 и жестко фиксируется в вертикальном положении зажимным устройством 8. Грунт 4 послойно отсыпается вокруг модели и уплотняется ручным трамбованием до заданной величины.

Для эксперимента была разработана конструкция модели сваи из оргстекла, позволяющая производить замеры давления и изгибающих моментов по её высоте. Она представляет собой призматический стержень длиной 40 см и сечением 30×24 мм, к которому с лобовой стороны крепятся тензодатчики давления размерами 30×30×6 мм, увеличивающие общее сечение модели до 30×30 мм (рис. 2). Чувствительными элементами для датчиков давления служили тензорезисторы типа КФ 5 П1-3-100-В-12 с базой 3 мм и тензочувствительностью $k=2,09$, а моментными были тензорезисторы типа КФ 4 П1-10-100-В-16 с базой 10 мм и тензочувствительностью $k=2,2$.

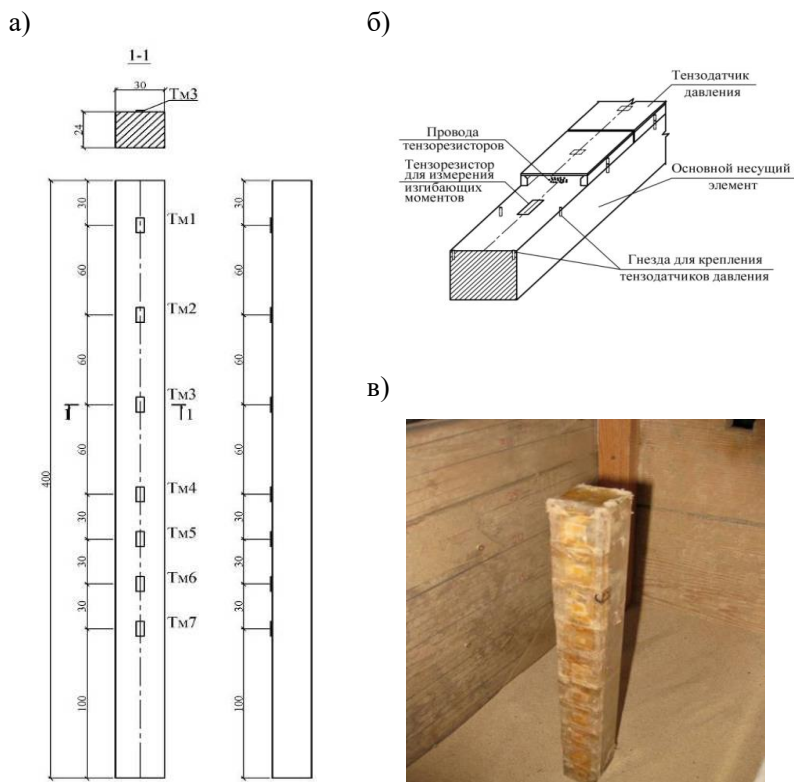


Рис. 2. Устройство модели сваи: а – основной несущий элемент (каркас) модели сваи с тензодатчиками для изгибающих моментов; б – вспомогательный элемент модели сваи с тензодатчиками для измерения давления; в – модель после установки в лотке.

Такая схема принята из-за малых размеров модели, не позволяющих выполнить парную коммутацию, когда каждый активный тензорезистор включается в измерительный тракт с компенсационным тензорезистором. Так как свая работает на одностороннее загрузку по консольной схеме, то и размещение моментных тензорезисторов на модели и крепление датчиков давления выполнены с одной стороны с шагом 3...6 см. Тензорезисторы были коммутированы по групповой схеме (7-10 активных тензорезисторов на 1 компенсационный). Эксперименты проводились в следующем порядке: перед началом опыта производится тарировка модели; модель сваи устанавливается на стенде в вертикальное положение, фиксируется винтами с последующей зачеканкой шва заделки алебастром; на неподвижную удерживающую конструкцию устанавливается подвижный бездонный лоток, который центрируется относительно грузовой подвески; в лоток укладывается грунт с послойным уплотнением трамбовкой через 5 см до общей мощности 30 см; монтируются на установке измерительные приборы; установка в снаряженном состоянии выдерживается около 2 часов; производится загрузка тарированными грузами ступенями по 2 кг с выдержкой до 10 мин.

В процессе опытов замеряется перемещение подвижной части лотка и сопротивления тензорезисторов модели. Оползневой грунт моделируется кварцевым мелким песком, характеристики которого в воздушно-сухом состоянии приведены в табл. 1. Измеренные данные статистически обрабатывались по методике, изложенной в [17, 18]. Коэффициент вариации c_v при этом изменялся от 2 до 7,5 %.

Таблица 1

Характеристики грунта использованного в опытах

Грунт	Плотность ρ , г/см ³	Влажность W	Коэффициент пористости e	Угол внутреннего трения φ , град
Песок мелкий	1,64...1,69	0,02	0,57...0,62	29...30

АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Электрическая схема экспериментальной установки изображена на рис. 3. В нее входят: 1 - чувствительные элементы в виде тензодатчиков 1; 2 - линии связи тензодатчиков 2; 3 - цифровой измеритель деформаций 3; 4 - компьютер 4. Электрические сигналы от тензорезисторов регистрировались цифровым измерителем деформаций. Проанализируем интегральную погрешность измерений для экспериментальной установки, состоящей из блоков 1-4.

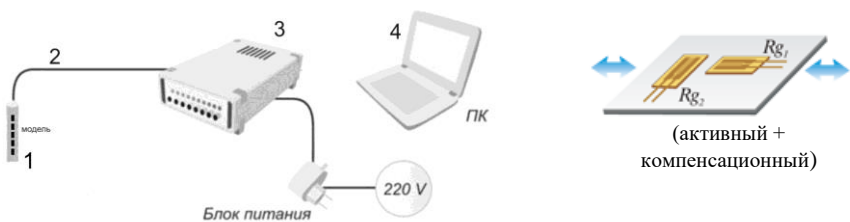


Рис. 3. Электрическая схема экспериментальной установки

Математическая модель формирования результата измерения, адекватно отражающая процесс измерения, должна учитывать влияние на результат измерения всех материальных элементов, участвующих в измерении. Основными материальными объектами, участвующими в измерении, являются: *объект измерения*; *средство измерения*; *среда (рабочие условия измерения)*.

Объект измерения. Как материальный объект, объект измерения – модель сваи-шпонки является «носителем» измеряемой величины. Иногда под объектом измерения подразумевают саму измеряемую величину и тем самым измеряемая величина как бы отрывается от материального объекта, соответствующее свойство которого она характеризует. Однако в процессе измерения объект измерения (модель сваи-шпонки) взаимодействует со средой и со средством измерения. Результатом такого взаимодействия может быть возмущение, искажающее измеряемую величину (возмущение на входе в систему измерений) и как возмущение, вызывающее отклонение коэффициента чувствительности системы измерений. Эти особенности объекта измерения и его взаимодействие со средой и с системой измерений можно учесть введением в математическую модель формирования результата измерения соответствующего возмущения на входе и отклонения коэффициента чувствительности системы измерений.

Среда (рабочие условия измерений). Среда, в которой реализуется измерение, взаимодействует непосредственно с объектом измерения (моделью сваи-шпонки) и средством измерения. В измерительном процессе представляет интерес только такое взаимодействие среды с объектом измерения, которое приводит к изменению измеряемой величины. Такое влияние среды учитывается введением дополнительного возмущения на входе и сводится к изменению коэффициента чувствительности системы измерений. В среде существуют также различного рода помехи (электромагнитные поля и др.) и другие возмущения, которые аддитивным образом действуют непосредственно на измеряемую величину и результат измерения. Например, при работе со

средствами измерений со стрелочной индикацией (аналоговая система измерений), к числу возмущений, искажающих результат измерения, можно отнести субъективные погрешности оператора, вносимые им при считывании положения стрелки на шкале приборов.

Средство измерения. В процессе экспериментов система измерений взаимодействует со средой, объектом измерения (моделью сваи-шпонки) и, естественно, измеряемой величиной. Наиболее полной математической моделью системы измерений является динамическая модель, отражающая её динамические свойства: инерционные; диссипативные и т.д. свойства.

На основе вышеизложенного обобщенную структурную схему формирования результата измерения с использованием аналоговой системы измерений можно представить в следующем виде (рис. 4).

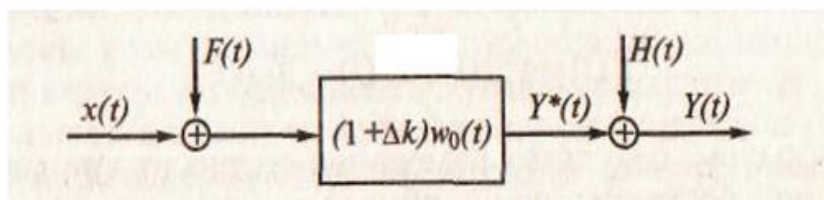


Рис. 4. Обобщенная структурная схема формирования результата измерения с использованием аналоговой системы измерений

Здесь $x(t)$ – измеряемая величина; $Y^*(t)$ – промежуточный результат измерения; $Y(t)$ – итоговый результат измерения; $F(t)$ – обобщенное аддитивное случайное возмущение, действующее на входе системы измерений; Δk – обобщенное отклонение коэффициента чувствительности системы измерений; $w_0(t)$ – нормированная весовая функция, отражающая динамические свойства системы измерений (инерционные, диссипативные и т.д.); $H(t)$ – обобщенное аддитивное случайное возмущение, действующее на выходе системы измерений.

Составляющими обобщенного возмущения $F(t)$ могут быть: воздействие среды на объект измерения, непосредственно на измеряемую величину; эффект взаимодействия системы измерений с объектом измерения.

Составляющими обобщенного отклонения Δk являются: отклонения, обусловленные производственно-технологическими факторами; влияющими величинами, характеризующими среду; эффектами взаимодействия системы измерений с объектом измерения.

Составляющими обобщенного возмущения $H(t)$ могут быть: внутренние шумы системы измерений, приведенные к его выходу; эффекты округления результата измерения; воздействие среды непосредственно на результат измерения; эффекты взаимодействия системы измерений с объектом измерения; субъективные ошибки оператора, выполняющего измерения.

В результате система уравнений, соответствующая структурной схеме формирования результата измерения (рис. 6), может быть представлена в виде:

$$Y(t) = Y^*(t) + H(t)$$

$$Y^*(t) = (1 + \Delta k) \int_0^t w_0(\tau) [x(t - \tau) + F(t - \tau)] d\tau = y_x(t) + Y_f(t), \quad (1)$$

где

$$y_x(t) = (1 + \Delta k) \int_0^t w_0(\tau) x(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

– мультипликативная составляющая результата измерения;

$$Y_f(t) = (1 + \Delta k) \int_0^t w_0(\tau) F(t - \tau) d\tau \quad (3)$$

– аддитивная составляющая результата измерения, обусловленная обобщенным возмущением $F(t)$, действующим на входе системы измерений.

Подставив (2) и (3) в (1) в результате будем иметь:

$$Y(t) = y_x(t) + Y_f(t) + H(t). \quad (4)$$

Результат измерения содержит три характерные составляющие:

1. составляющая $y_x(t)$ - обусловлена измеряемой величиной;
2. составляющая $Y_f(t)$ - обусловлена обобщенным возмущением на входе $Y(t) = y_x(t) + Y_f(t) + H(t)$;
3. составляющая $H(t)$ - обусловлена обобщенным возмущением на выходе $Y(t) = y_x(t) + Y_f(t) + H(t)$.

В результате расчетов по (4) получим, что среднеквадратическое отклонение (СКО) результата единичного измерения будет равно:

$$СКО \approx 0,15B$$

Вклад этой погрешности был учтен при оценке интегральной погрешности единичного эксперимента, которая имеет следующие

составляющие:

- погрешность результата измерения;
- погрешность конструкции модели сваи-шпонки (погрешности геометрического подобия);
- погрешность моделирования сваи-шпонки (несоответствие фактических характеристик модели сваи-шпонки критериям моделирования, т.е. погрешности кинематического и динамического подобия);
- погрешность чувствительных элементов (самих тензодатчиков, их в наклеенном на модель виде и т.д.);
- погрешность обработки результатов измерений (погрешность математического метода, погрешности округления, погрешность вычисления на ПК);
- и т.д.

В результате, интегральная погрешность единичного эксперимента варьировалась от 8 до 14 % в зависимости от длины модели сваи-шпонки, условий нагружения и других факторов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе работы выявилась необходимость выбора оптимального режима испытаний, в которых могут быть получены результаты наиболее соответствующие расчетным предпосылкам. Увеличение нагрузки при испытании производят обычно «ступенями» [19]. Этот способ загрузки заключается в том, что нагрузку увеличивают небольшими долями, ожидая после очередного увеличения нагрузки «затухания» перемещений. Возникает вопрос о том, как быстро возможно увеличивать нагрузку, не опасаясь, что характер деформации при этом существенно не изменится. В условиях более медленного нагружения все деформации грунта успевают полностью реализоваться; в условиях быстрого нагружения развитие деформаций отстаёт от развития напряжений и зона деформаций имеет меньшее распространение.

Сравнение результатов «скоростных» опытов в лотках (продолжительность опыта около 1 мин) и опытов с медленным возрастанием нагрузки (в течение нескольких десятков минут или нескольких часов) показывает, что перемещения отличаются в пределах точности эксперимента (до 10%). Был принят оптимальный режим испытаний при временном интервале между ступенями нагружения равном 10...15 мин. В соответствии с целью лабораторных исследований было проведено 5 видов лабораторных испытаний с четырехкратным повторением: сдвига лотка без модели и сдвиги с моделями длинами соответственно 30 см, 24 см,

15 см и 9 см, которые определялись на основе равенства π -переменных модели и натуре (условие (4)). Мощность засыпки во всех видах эксперимента была постоянной – 30 см. Таким образом, общее число основных опытов было 20. Схемы опытов показаны на рис. 5. По полученным экспериментальным данным (показаниям тензорезисторов) были построены осредненные эпюры изгибающих моментов для различных видов нагружения.

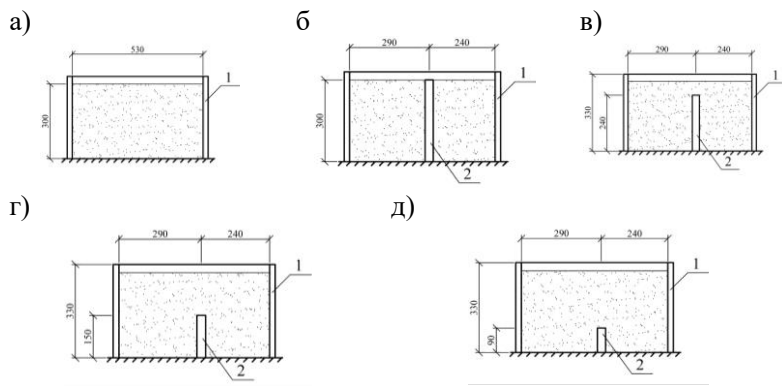


Рис. 5. Схемы опытов: а – опыт № 1 сдвиг лотка без модели; б – опыт № 1 вид сверху; в – опыт № 2 сдвиг лотка с моделью $l=30$ см; г – опыты № 2-5 вид сверху; д – опыт № 3 сдвиг лотка с моделью $l=24$ см; е – опыт № 4 сдвиг лотка с моделью $l=15$ см; ж – опыт № 5 сдвиг лотка с моделью $l=9$ см; 1 – лоток; 2 – модель сваи

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для сравнения с экспериментальными данными определены расчетные изгибающие моменты в заделке сваи. Распределение давления по модели рассматривалось по двум схемам (рис. 6-7) – по треугольнику (трапеции) и по прямоугольнику [20, 21].

Было принято, что нагрузкой на сваю E_i является разность между степенью нагружения при сдвиге лотка с моделью P_i и нагрузкой при полном сдвиге лотка без модели $P_{л}$:

$$E_i = P_i - P_{л}. \quad (5)$$

Интенсивности давления q_i и изгибающие моменты M_i рассчитаны по известным формулам статики сооружений как для консольно-защемленного стержня.

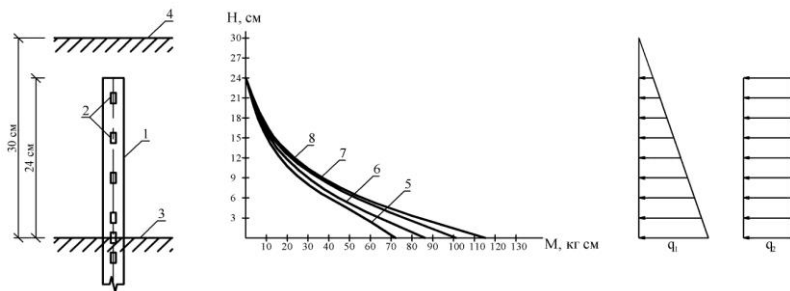


Рис. 6. Эпюры изгибающих моментов, полученных экспериментальным путем для модели сваи длиной $l=24$ см: 1 – модель сваи; 2 – тензорезисторы; 3 – поверхность скольжения; 4 – поверхность засыпки; 5 – 8 изгибающий момент M_z от нагрузки на подвеске соответственно 40, 42, 44, 46 кг

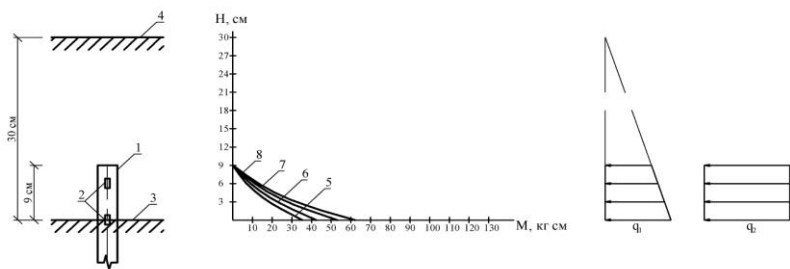


Рис. 7. Эпюры изгибающих моментов, полученных экспериментальным путем для модели сваи длиной $l=9$ см: 1 – модель сваи; 2 – тензорезисторы; 3 – поверхность скольжения; 4 – поверхность засыпки; 5 – 8 изгибающий момент M_z от нагрузки на подвеске соответственно 40, 42, 44, 46 кг

В табл. 2 даны нагрузки на модели свай, экспериментальные M_z и расчетные M_i изгибающие моменты в заделке для различных ступеней нагружения, а также относительная разность Δ между ними. Полученный экспериментальный материал дает возможность судить насколько изгибающие моменты, полученные теоретическим путем, соответствуют экспериментальным значениям. Из табл. 2 следует, что экспериментальные значения момента близки к расчетным при следующих эпюрах давления:

- треугольная эпюра Δ до 10% - для модели полной длины $l = H = 30$ см, центр давления находится на высоте $0,3 \dots 0,36 l$, что сравнимо со

значением $1/3H$ по [9, 20];

- усеченная треугольная эпюра Δ до 6,7% - для модели длиной $l = 0,8H = 24$ см, центр давления находится на высоте $0,35 \dots 0,4 l$;
- прямоугольная эпюра Δ до 14% - для модели длиной $l = 0,5H = 15$ см, центр давления находится на высоте $0,43 \dots 0,57 l$;
- прямоугольная эпюра Δ до 3,5% - для модели длиной $l = 0,3H = 9$ см, центр давления находится на высоте $0,49 \dots 0,52 l$.

Таблица 2

Значения изгибающих моментов в опытных сваях при различных условиях нагружения

Степень нагружения, кг		$E_{i,k}$ Г	Длина модели					
			$l = 24$ см			$l = 9$ см		
P_i	P_L		M_3 , кг см	M_i , кг см	$\Delta\%$	M_3 , кг см	M_i , кг см	Δ %
40	32, 5	7,5	72	$\frac{67,2^*}{90}$	$\frac{6,7}{20}$	35	$\frac{16,2^*}{33,8}$	$\frac{54}{3,4}$
42		9,5	86	$\frac{85,1^*}{114}$	$\frac{1,0}{25}$	42	$\frac{20,5^*}{42,8}$	$\frac{51}{1,9}$
44		11, 5	101	$\frac{103^*}{138}$	$\frac{1,9}{27}$	53	$\frac{24,8^*}{51,8}$	$\frac{53}{2,3}$
46		13, 5	115	$\frac{121^*}{162}$	$\frac{5,0}{29}$	63	$\frac{29,2^*}{60,8}$	$\frac{54}{3,5}$

*Примечание:

- в числителе расчетный изгибающий момент при распределении эпюры давления по треугольнику (трапеции);
- в знаменателе по прямоугольнику.

Результаты экспериментальных исследований были использованы при строительстве жилых объектов Автономной Республики Крым, Украина. Конструкция противооползневых сооружений в комплексе с дренажной системой была предложена для укрепления склона в районе строительства спортивно-оздоровительного центра «Единство» в пгт. Гурзуф. Инженерно-геологические изыскания выполнены АП Изыскательская экспедиция №5 «Фундаментпроект».

ВЫВОДЫ

1. Проанализирована математическая модель формирования результата измерения, адекватно отражающая процесс измерения и учитывающая влияние на результат объекта измерения, средства измерения и среды измерения. Она легла в основу формирования погрешности

результата измерения: среднеквадратическое отклонение результата единичного измерения составило 0.15 Вольт. Интегральная погрешность единичного эксперимента варьировалась от 8 до 14 % в зависимости от длины модели сваи-шпонки, условий нагружения и других факторов.

2. Экспериментальные исследования взаимодействия модели сваи-шпонки с грунтовым массивом в лотке показали влияние длины сваи-шпонки в оползневой толще на форму эпюры давления. Для модели сваи-шпонки, моделирующей её полную длину $l = H$, эпюра давления носит преимущественно треугольный характер, что не противоречит ранее известным результатам Гинзбурга Л. К. [9, 20], которые основывались, преимущественно, на теоретических предположениях. С уменьшением длины модели сваи-шпонки от $l = H$ до $l = 0,5H$ эпюра давления изменяется от треугольной формы до трапецевидной формы, что соответствует предположениям [21]. При длине сваи $l = 0,5H$ и менее эпюра давления трансформируется от трапецевидной формы к прямоугольной.

3. Предложенная прикладная методика, разработанная на основе обработки материалов экспериментальных исследований и практического опыта строительства в условия АРК, Украина, внедрена при устройстве противооползневых сооружений из свай-шпонок для территории строительства спортивно-оздоровительного центра «Единство» в пгт. Гурзуф. Она позволила принять экономически и конструктивно целесообразные решения удерживающих сооружений, при которых обеспечивается надежная эксплуатация строений и оползневых территорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lacasse S. (2013) 8th Terzaghi Oration Protecting society from landslides – the role of the geotechnical engineer. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris. - P.15-34.
3. Sassa K. (2005) Landslides: Risk analysis and sustainable disaster management. Kyoji Sassa (Ed.), Hiroshi. Fukuoka (Ed.), Fawu Wang (Ed.), Gonghui Wang (Ed.). Springer-Verlag, Berlin, Germany. (ISBN-10: 3540286640, ISBN-13: 978-3540286646) 385p.
4. Lollino, G. (2014) Engineering Geology for Society and Territory IAEG XII Congress Volumes Lollino, Giorgio (Ed.), 8643 p. 8 volume-set.
5. Baum, R.L., Godt, J.P., Harp, E.L., McKenna, J.W. & McMullen, S.R. (2005). Early warning of landslides for rail traffic between Seattle and Everett, Washington, USA. In O. Hungr, R. Fell, R. Couture & E. Bernhard (eds), Landslide Risk Management, Proc. of the International Conference on Landslide Risk Management: 731–740. New York: A.A. Balkema.

6. Highland L., Bobrowsky P. (2008) The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides: Reston, U.S. Geological Survey Circular, Virginia, 129 p.
7. Абросимов В. Г. Работа подпорных сооружений из буронабивных свай : автореф. дис. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Строительные конструкции» / Абросимов В. Г. – Киев, 1988. – 18 с.
8. Метелюк Н. С. Влияние защемления головы сваи в ростверке на её сопротивление горизонтальной нагрузке / Н. С. Метелюк, Г. Ф. Шишко, Г. Ф. Михайленко // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1971. – №4. - С. 18-22.
9. Распределение усилий между рядами свай противооползневой конструкции / [Л. К. Гинзбург, В. Е. Коваль, В. Б. Лапкин, В. С. Васковская] // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1990. – №2. – С. 7-11.
10. Экспериментально-теоретическое исследование давления грунта на удерживающие противооползневые сооружения: Отчет о НИР (заключительный) / ГПИ им. Ленина. № регистр. 80021424; Инв. №0283.0049894. – Тбилиси, 1982. – 90 с.
11. Назарова Н. В. Противооползневые конструкции в виде продольных удерживающих стен : автореф. дис. канд. техн. наук : спец. 05.23.02 «Основания и фундаменты» / Назарова Н. В. – Киев, 1991. – 22 с.
12. Державне геологічне підприємство “Геоінформ” Інформаційний бюллетень про стан геологічного середовища України у 1996 році. - Вип. 15. – К.: 1998. - 132 с.
13. Рудько Г. И. Оползни и другие геодинамические процессы горноскладчатых областей Украины (Крым, Карпаты): монография / Г. И. Рудько, И. Ф. Ерыш – К.: Задруга, 2006. – 624 с.
14. Метрология. Основные понятия и математические модели : учеб. пособие для вузов / Н. Г. Назаров. – М.: Высш. шк., 2002. – 348 с.
15. Поляков Л. П. Моделирование строительных конструкций / Л. П. Поляков, В. Д. Файнбурд. – К.: Будівельник, 1975. – 160 с.
16. Экспериментальная механика: В 2-х кн.: Кн. 2. Пер. с англ., Под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 552 с.
17. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк ; пер. с англ. Коваленко Е. Г. – под ред. Бусленко Н. П. – М.: Мир, 1972. – 384 с.
18. Соловьев С. Д. Элементы теории вероятностей и математической статистики / С. Д. Соловьев. – Хабаровск: Книжное издательство, 1968. – 114 с.
19. Лазебник Г. Е. Давление грунта на сооружения / Г. Е. Лазебник. – К.: ППНВ, 2005. – 243 с. – (Разработка аппаратуры и проверка методик экспериментального определения давления. Результаты опытных исследований. Рекомендации для расчетов).
20. Гинзбург Л. К. Противооползневые удерживающие конструкции / Л. К. Гинзбург. – М.: Стойиздат, 1979. – 80 с.
21. Шахуняц Г. М. Земляное полотно железных дорог / Г. М. Шахуняц – М.: Транжелдориздат, 1953. – 827 с.

REFERENCES

1. Lacasse S. (2013) 8th Terzaghi Oration Protecting society from landslides – the role of the geotechnical engineer. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris. - P.15-34.
3. Sassa K. (2005) Landslides: Risk analysis and sustainable disaster management. Kyoji Sassa (Ed.), Hiroshi. Fukuoka (Ed.), Fawu Wang (Ed.), Gonghui Wang (Ed.). Springer-Verlag, Berlin, Germany. (ISBN-10: 3540286640, ISBN-13: 978-3540286646). - 385p.
4. Lollino, G. (2014) Engineering Geology for Society and Territory IAEG XII Congress Volumes Lollino, Giorgio (Ed.). 8 Volume-set. - 8643 p.
5. Baum, R.L., Godt, J.P., Harp, E.L., McKenna, J.W. & McMullen, S.R. (2005). Early warning of landslides for rail traffic between Seattle and Everett, Washington, USA. In O. Hungr, R. Fell, R. Couture & E. Bernhard (eds), Landslide Risk Management, Proc. of the International Conference on Landslide Risk Management: P.731–740.
6. Highland L., Bobrowsky P. (2008) The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides: Reston, U.S. Geological Survey Circular, Virginia, 129 p.
7. Abrosimov V. Work of retaining structures from bored piles: Ph.D. thesis on Tech. Sci.: 05.23.01 "Building constructions" / NIISK. - Kiev, 1988. - 18 p.
8. Metelyuk N. Impact of head of pile crushing in the retaining walls on its resistance to horizontal loading / N. Metelyuk, G. Szyszko, G. Mikhaylenko // Grounds, foundations and soil mechanics. - 1971. - № 4. - P. 18-22.
9. Ginzburg L. Distribution of efforts between the rows of piles in retaining constructions / L. Ginzburg, V. Koval, V. Lapkin, V. Vaskovskaya // Grounds, foundations and soil mechanics. - 1990. - № 2. - P. 7-11.
10. Experimental and theoretical study of earth pressure on retaining structures landslide: Research report (final) / Lenin library. Register number. 80021424; Inv. №0283.0049894. - Tbilisi, 1982.- 90 p.
11. Nazarov N. Landslide structure in the form of longitudinal retaining walls: Ph.D. thesis on Tech. Sci.: 05.23.02 «Foundations» / KEBI. - Kyiv, 1991. - 22 p.
12. State Geological Enterprise "Geoinform" Information Bulletin on the state of the geological environment of Ukraine in 1996. Vol. 15. - K.: 1998. - 132 p.
13. Rudko G. Landslides and other geodynamic processes in mountain regions of Ukraine (Crimea, Carpathians): Monograph / G. Rudko, J. Eryshev - K.: Zadruga, 2006.- 624 p.
14. Metrology. Basic concepts and mathematical models: Manual for students / N. Nazarov. - M.: Higher School, 2002. – 348 p.
15. Polyakov L., Faynburd V. Modeling of constructions / L. Polyakov, V. Faynburd. - K.: Budivelnik, 1975. - 160 p.
16. Experimental Mechanics: The 2 books: Book 2. Transl. from english., Ed. A. Kobayashi. - M.: Mir, 1990. - 552 p.
17. Schenk H. Theory of Engineering Experiment / H. Schenk; Transl. from english. Kovalenko E. - ed. Buslenko N. – M.: Mir, 1972. - 384 p.

18. Soloviev S. Elements of the theory of probability and mathematical statistics / S. Solovyov. - Khabarovsk: Book Publishing, 1968. - 114 p.
19. Lazebnyk G. Soil pressure on structures / G. Lazebnyk. - K. : PPNV, 2005. - 243 p. - (Development of equipment and testing methods of experimental determination of the pressure results of experimental studies Recommendations for calculations).
20. Ginsburg L. landslide retaining structures / L. Ginsburg. - M.: Stoyizdat, 1979. - 80 p.
21. Shahunyants G. Subgrade railways / G. Shahunyants - M. : Tranzheldorizdat, 1953. - 827 p.

Статья поступила в редакцию 10.06.2016 г.