

УДК 624.131.4

ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПОЗИТНОЙ МОДЕЛИ “ГРУНТ–ЦЕМЕНТНЫЙ МАТЕРИАЛ”

© 2024 г. В. Н. Кутергин^{1,*}, Ф. С. Карпенко¹, С. И. Фролов¹¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: kvan20@bk.ru

Поступила в редакцию 27.05.2024 г.

После доработки 28.08.2024 г.

Принята к публикации 10.10.2024 г.

Грунтовые массивы имеют тесный контакт с фундаментами, сваями, ограждающими и закрепляющими конструкциями (анкерами, шпунтами, подпорными стенками), а также армирующими грунт при технической мелиорации инъекционными жилами. Телом многих из них служат твердеющие цементные материалы, имеющие межфазную границу раздела с грунтом. Систему “грунт–материал” можно рассматривать как композитную, в которой составляющие при взаимодействии проявляют новые качества. Разработаны специальные методики сдвига моделей свай, представляющих собой плашки из цементного материала, по образцам грунта. Выполнены экспериментальные исследования взаимодействия цементного материала и вмещающих дисперсных и скальных пород, изучены его особенности, обусловленные материалом, концентрацией вяжущего, характером поверхности, обводнением, взаимопроникновением цементного материала и вмещающих пород. Приведены результаты исследований влияния гладкой и шероховатой поверхности плашек в условиях обводнения, даны значения коэффициентов трения, контактного сцепления. Предложена зависимость для определения предельных напряжений сдвига композитных моделей при контакте песков и скальных пород с материалом плашек. Для скальных пород, в которых моделировалось твердение материала свай, получены значения предельных напряжений и модулей деформаций сдвига в зависимости от концентрации вяжущего в цементном растворе.

Ключевые слова: *грунты, цементный материал, сваи, композитная модель, прочность на сдвиг, коэффициент трения, контактное сцепление, концентрация вяжущего*

DOI: 10.31857/S0869780924060063 EDN: ALUETY

ВВЕДЕНИЕ

Грунтовый массив может служить вмещающим объемом, основанием или телом инженерных сооружений. При этом он находится в тесном контакте с материалом сооружений: основаниями и стенами фундаментов, ограждающих и закрепляющих конструкций (анкеров, шпунтов, подпорных стенок), а также сеткой армирующих грунт инъекционных вкраплений и жил. Наиболее часто конструкции, а также рецептура инъекций проектируются на основе цементного материала.

Такую систему из неоднородных (гетерогенных) компонентов с границей раздела (поверхностью контакта) или промежуточным межфазным обводненным слоем можно рассматривать как композиционный материал (композит). Грунтовый массив, выступающий в роли заполнителя (матрицы), и армирующий элемент (цементный материал) находятся в определенном взаимодействии, при котором каждый из них проявляет

свои свойства, а композит в целом может обнаруживать новые качества, не присущие компонентам в отдельности.

Оценка особенностей подобного контактного взаимодействия, а также параметров прочности возникающей композитной системы “грунт–материал” важна для инженерных расчетов.

Наиболее масштабным по объемам и поверхности взаимодействия с грунтом можно считать использование свайных фундаментов, особенно при строительстве зданий повышенной этажности. Тенденция роста этажности сооружений наблюдается во многих российских крупных городах. В проектах высотных новостроек предусматривается более 30 этажей, при этом высота комплексов с “небоскребами” составляет не менее 100 м, а нагрузки на грунты оснований достигают значений ~1–2 МПа [7]. Выбор свайного фундаментирования определяется глубиной залегания прочных пород, которые могут воспринять такие высокие нагрузки. Свайные фундаменты в виде глубоких опор располагаются как в дисперсных,

так и в скальных породах оснований сооружений. Для высотных зданий глубина заложения свай может составлять 40–120 м.

Большие заглубления опор и высокие нагрузки на грунты обуславливают ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании [4, 5]. В частности, для расчетов несущей способности важное значение имеют особенности взаимодействия свай как с дисперсными грунтами массива, так и прорезаемыми ими скальными породами.

Величина напряжений сдвига, возникающих при перемещении свай относительно вмещающих пород, определяется силами трения (коэффициентом трения на контакте конструкции с грунтом, $tg\varphi_s$) и адгезионными свойствами материалов (контактным сцеплением, C).

Для массового проектирования свайных фундаментов в дисперсных грунтах расчет сопротивлений по боковой поверхности забивных, вдавливаемых свай и свай-оболочек регламентируется СП 24.13330.2021 “Свайные фундаменты”, но имеет ограничения по длине свай (до 40 м). Для прорезаемых скальных пород рекомендуется расчет на основе результатов определения их прочности, но не на сдвиг, а на одноосное сжатие.

Учет непосредственно сил трения для гравитационных сооружений при плоском сдвиге предписан СП 23.13330.2018 “Основания гидротехнических сооружений”. Рекомендованы прямые определения $tg\varphi_s$, а в случае их отсутствия – принятие значений, составляющих не более 2/3 значения коэффициента внутреннего трения грунта ($tg\varphi$), контактирующего с сооружением.

Для скальных грунтов параметры сдвига ($tg\varphi$ и C) предписывается определять прямыми измерениями прочности на сдвиг. Для менее ответственных сооружений значения параметров табулированы и варьируют в широких пределах в зависимости от изменения их структуры, трещиноватости, раскрытия трещин и состава их заполнителя.

При оценке контактного сцепления C следует отметить, что проявление адгезионных свойств грунтов изучено и освещено недостаточно полно. Анализируя этот аспект взаимодействия грунтов и цементного материала, можно обратить внимание на исследования в смежных областях. Так, весьма близки теме исследований некоторые аспекты методики и результаты определения “прочности тангенциального сцепления” материала (цементного раствора) с различными типами кирпичной кладки, изложенные в работе [1]. Аналогичная задача актуальна и для грунтов, в частности скальных, контактирующих с цементным материалом конструкций.

Основная цель настоящих исследований – оценка прочности (коэффициента контактного

трения $tg\varphi_s$, коэффициента внутреннего трения $tg\varphi$ и контактного сцепления C) композитной системы “грунт–цементный материал” при взаимодействии компонентов в различных условиях.

Задачи исследований определялись условиями, обуславливающими характер взаимодействия, и заключались в оценке влияния:

- материала и характера поверхности;
- наличия или отсутствия обводнения;
- взаимопроникновения составляющих композитной системы “грунт–цементный материал”.

Для решения задач были выполнены серии экспериментов по определению сопротивления сдвигу композитных моделей “грунт–цементный материал”. Предварительно был выполнен комплекс испытаний грунтов природного массива. Полученные данные в последующем были использованы для сопоставительного анализа механических характеристик исходных образцов грунта и результатов испытаний композитных моделей.

В качестве исходного материала использовались образцы грунтов типового разреза, характерного для северной части г. Москвы, представляющего чередование дисперсных грунтов, а также выветрелых и монолитных скальных пород.

ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для испытаний природных дисперсных грунтов использовались приборы трехосного сжатия (стабилометры) типа СТ-70 [2, 3]. Испытания скальных и полускальных пород на сжимаемость и прочность выполнялись с помощью прибора трехосного сжатия скальных грунтов Control's 45-D0556, при всестороннем обжатии 0.0–12.0 МПа.

Исследования взаимодействия цементного материала и образцов грунтов проводились в ходе сдвиговых испытаний на приборе плоскостного сдвига Control's 50-C36/G2, с программируемым управлением и автоматической регистрацией параметров эксперимента.

Укрупненно основной испытательный узел сдвигового прибора показан на рис. 1а. В нижнюю, жестко закрепленную часть каретки прибора (1), помещался образец исследуемой породы (2). Вертикальная нагрузка в диапазоне давлений $\sigma = 0.025–0.46$ передавалась через верхний штамп (4) прибора. В верхней подвижной части каретки (на рис. 1а ее кожух не показан) располагалась модель сваи (3), выполненная в виде цементной плашки квадратного сечения площадью 36 см² (рис. 1б).

Для оценки параметров прочности композитных моделей “грунт–цементный материал” разрабатывались и использовались методики, включающие несколько схем испытаний.

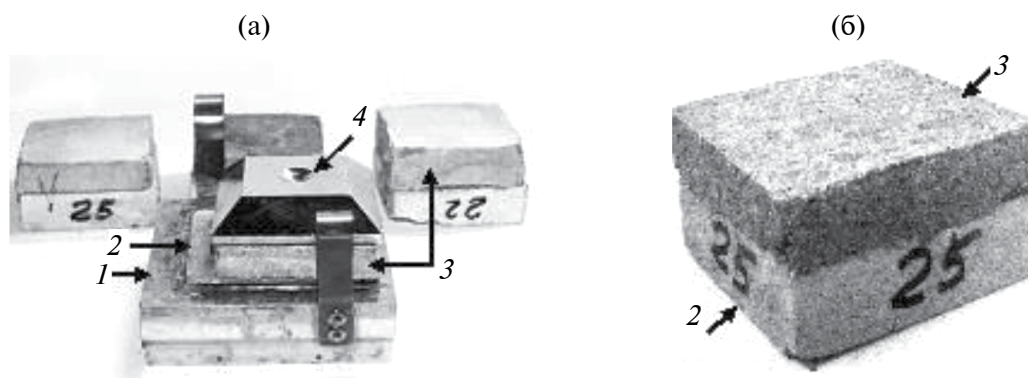


Рис. 1. Испытательный узел сдвигового прибора Control's 50-C36/G2 (а) и объект — испытываемый образец (б). Пояснения в тексте.

При подготовке к испытаниям грунт природного сложения располагался в нижней части сдвиговой обоймы таким образом, чтобы поверхность образца выступала над ее краем на 1–2 мм. При заполнении обоймы грунтом нарушенного сложения (песчаные образцы) достигалась его требуемая плотность. Затем на поверхность грунта помещалась плашка из материала свай, верхняя часть обоймы поднималась над нижней, чтобы в зазоре между верхней и нижней частями обоймы оказалась плоскость контакта между грунтом и плашкой. В некоторых опытах образец грунта и плашка готовились совместно в специальной форме, а затем помещались в составную обойму сдвигового прибора.

В такой модели цементный раствор, как основной связующий компонент бетонного материала свай, при различных вариантах подготовки плашек моделировал, как гладкую поверхность цементной матрицы бетона, так и шероховатую мелкозернистого заполнителя. В качестве материала для плашек использовался раствор цемента марки М400 различной концентрации. Время затвердевания при различных концентрациях составляло 2 дня.

Испытания проводились путем сдвига верхней подвижной каретки сдвигового прибора (с плашкой из материала свай) относительно нижней неподвижной каретки, вмещавшей образец грунта. Измерялись горизонтальные сдвигающие усилия τ , возникающие при перемещении верхней каретки с постоянной заданной скоростью 0.1 мм/мин. После испытаний (не менее 3-х при разных значениях вертикальной нагрузки σ) определялись параметры сдвига в виде линейной зависимости

$$\tau = k \cdot \sigma + C,$$

где $k = \operatorname{tg} \varphi_s$ или $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент трения, [д.е.]; σ – давление, нормальное к плоскости сдвига, [МПа]; φ_s или φ – угол трения [град.]; C – сцепление [МПа].

Для оценки влияния факторов, обуславливающих особенности взаимодействия материала свай с грунтом, выполнены следующие серии опытов.

Серия I. Испытания на сдвиг по грунту плашки из материала свай с гладкой поверхностью. Плашка из материала свай готовилась с виброуплотнением в гладкой опалубке, поверхности которой покрывались глинистым раствором.

Серия II. Испытания на сдвиг по грунту плашки из материала свай с шероховатой поверхностью. Плашка из материала свай готовилась с виброуплотнением в опалубке, дно которой имело неровную, шероховатую поверхность.

Серия III. Испытания на сдвиг по грунту плашки из материала, твердение которого происходило в контакте с поверхностью образца грунта природной влажности. Плашка из материала свай готовилась с виброуплотнением в опалубке, а затем помещалась на поверхность грунта природной влажности, где и происходило твердение.

Сдвиг плашек в сериях I–III проводился в водной среде.

Серия IV. Испытания на сдвиг по грунту плашки из материала с различным содержанием вяжущего компонента, твердение которого происходило в контакте с поверхностью образца водонасыщенного грунта. Плашка из материала свай с различной концентрацией вяжущего компонента ($V/C = 0.2–1.0$) готовилась виброуплотнением в опалубке, а затем помещалась на поверхность грунта. Твердение при этом происходило, как на поверхности, так и в верхней приграничной части грунта, куда раствор проникал, благодаря поровой воде, понижающей его вязкость.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАННЫХ ГРУНТОВ

Исходный грунтовый материал для исследований был охарактеризован комплексом определений состава и физико-механических свойств.

В испытаниях природных дисперсных пород были использованы четвертичные грунты, характеристика которых дана в табл. 1.

Нормативные характеристики физико-механических свойств исследованных древних (мезозойских и палеозойских) отложений, полученные по результатам трехосных испытаний образцов представлены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты испытаний, проведенных в рамках серии I (сдвиг гладкой плашки по грунту), показаны на рис. 2. Как видно из графиков, для песков, супесей и глин с увеличением дисперсности закономерно уменьшается трение и возрастает структурное сцепление. Для наиболее грубодисперсных, зернистых пород, даже в случае гладкой плашки все равно реализуются условия трения по шероховатой (зернистой) поверхности грунтов. Результат перемещения ровной, гладкой поверхности плашек отражает параметры трения, характерные для материала частиц, составляющих данный грунт. Для глинистых грунтов с преобладанием тонких частиц (до 50% и более), коэффициент трения составил $k = tg\varphi_s \approx 0.41$ ($\varphi_s \approx 22^\circ$). В супесях с преобладанием песчано-пылеватых частиц (до 80%) $k = tg\varphi_s \approx 0.48$ ($\varphi_s \approx 26^\circ$), в зернистых

грунтах с содержанием песчаных частиц до 95% $k = tg\varphi_s \approx 0.58$ ($\varphi_s \approx 30^\circ$).

Адгезионное взаимодействие зернистых и пылеватых грунтов с материалом гладких плашек практически отсутствует. Контактное сцепление глинистых частиц и поверхности гладких плашек в водной среде составило ~ 50 кПа. Его проявление и величина могут быть обусловлены, т.н. липкостью грунта, т.е. возникновением сил взаимодействия между молекулами связанной воды и частицами грунта, с одной стороны, и молекулами воды и поверхности соприкасающегося с грунтом материала – с другой [6].

Результаты испытаний в серии II при сдвиге плашки с шероховатой поверхностью иллюстрирует рис. 3.

Графики свидетельствуют, что для грубодисперсных песков и супесей характер зависимостей не меняется. Для глин в данной серии испытаний шероховатая поверхность плашек при сдвиге затрагивает приконтактный объем образца грунта, в котором и формируются поверхности сдвига. При этом усилия, отнесенные к полной площади поверхности грунта, включающей и пустоты, являются функцией пористости (n) и характеризуют внутреннее трение грунта: $k = tg\varphi = f(n)$. Полученные в опытах параметры прочности грунтового материала композитной модели ($W = 37.1\%$)

Таблица 1. Состав и свойства четвертичных грунтов

Глубина отбора, м	Наименование грунта	Содержание частиц, %			Влажность, %	Плотность, г/см³	Плотность частиц, г/см³	Коэффициент пористости, д.е.	Пластичность, %			Показатель текучести, д.е.
		песок	пыль	глина					W_p	W_L	I_p	
aQ III–V												
3.2	Супесь пластичная	76.5	7.8	15.7	16.6	2.12	2.67	0.469	17.6	13.8	3.8	0.74
6.0	Песок средней крупности	95.9	2.3	1.8	17.3	2.10	2.66	0.486				
4.0	Песок мелкий	93.2	3.1	3.7	17.0	2.10	2.66	0.482				
fQ II ^{o-d}												
12.5	Супесь пластичная	66.4	15.1	18.5	19.4	2.08	2.67	0.533	20.5	13.9	6.6	0.83
17.0	Песок средней крупности	92.2	2.9	4.9	18.4	2.09	2.65	0.501				
19.0	Песок средней крупности	90.6	4.7	4.7	16.7	2.10	2.65	0.473				

Таблица 2. Физико-механические свойства мезозойских и палеозойских пород

Геологический индекс	Верхнеюрские (J ₃)	Верхнекаменноугольные суворовские (C _{3sv})		Среднекаменноугольные мячковско-подольские (C _{3mc-pd})
Наименование породы	Глины твердые	Известняки глинистые и детритовые	Мергели	Известняки детритовые и глинистые
Интервал отбора, м	17.0—22.5	41.6—46.3	51.0—54.6	55.4-80.0
Нормативные значения				
Влажность (природная/при полном водонасыщении), W_e/W , %	30.1/37.1	8.4	5.4	9.2
Плотность, ρ , г/см ³	1.86	2.26	2.35	2.21
Плотность частиц, ρ_s , г/см ³	2.73	2.73	2.82	2.70
Коэффициент поперечной деформации, ν , д.е.	0.30			
Модуль общей деформации, E_O , МПа	20.4	6800	4900	5400
Параметры прочности	Сцепление C , кПа	72	7100	1500
	Угол внутр. трения Φ , град	16	31	31
Прочность на сжатие, R_c , МПа		16.9		

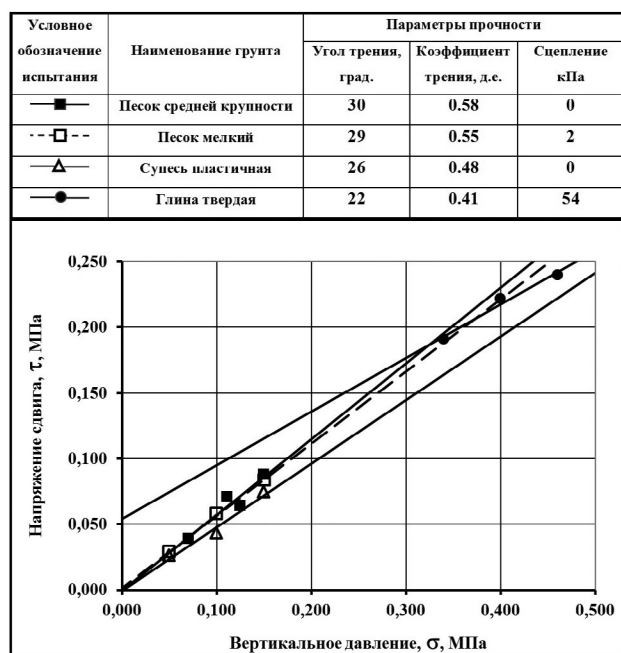


Рис. 2. Параметры прочности на сдвиг гладких плашек из цементного материала по образцам дисперсных грунтов.

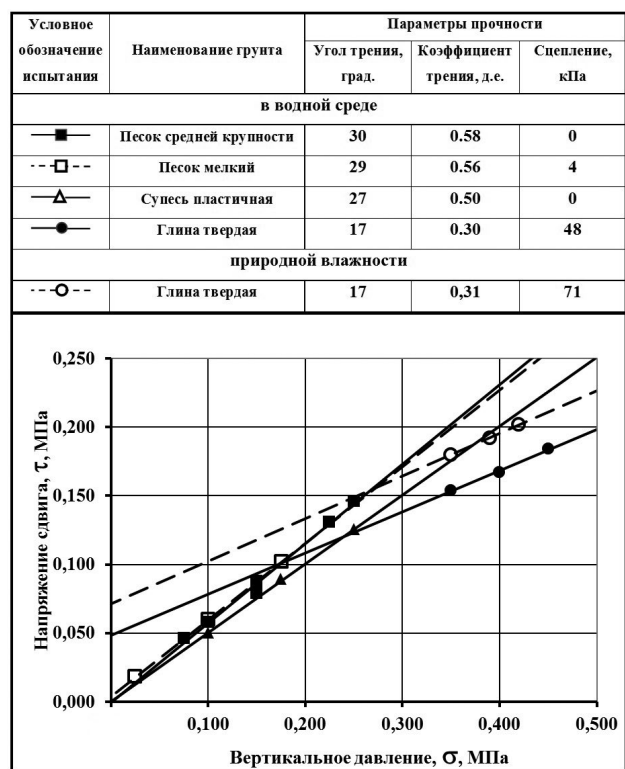


Рис. 3. Параметры прочности на сдвиг шероховатых плашек из цементного материала по образцам дисперсных грунтов.

составили: $\varphi = 17^\circ$, $C = 48$ кПа. Вовлечение в процесс сдвига структурных элементов грунта подтверждают результаты определения прочности глины природной влажности ($W_e = 30.1\%$). Сопоставление показывает неизменность угла внутреннего трения, при этом сцепление вследствие меньшей влажности увеличивается до 71 кПа.

Аналогичные сериям I и II испытания, характеризующие взаимодействие между материалом свай и вмещающими грунтами, были выполнены также для скальных пород. Сопоставление результатов сдвига плашек с гладкой и шероховатой поверхностью иллюстрируют графики испытаний, приведенные на рис. 4.

Результаты показывают, что гладкая поверхность материала плашек вследствие некоторого сродства с контактирующими породами и процессов адгезии на границе раздела обуславливает повышенные значения структурного сцепления: наибольшие для известняков ($C = 20$ кПа), наименьшие – для мергелей ($C = 11$ кПа). При шероховатой поверхности контакта ведущая роль во взаимодействии принадлежит силам трения; структурная связность уменьшается до ничтожных 2–4 кПа, коэффициент трения составляет 0.55–0.59 д.е.

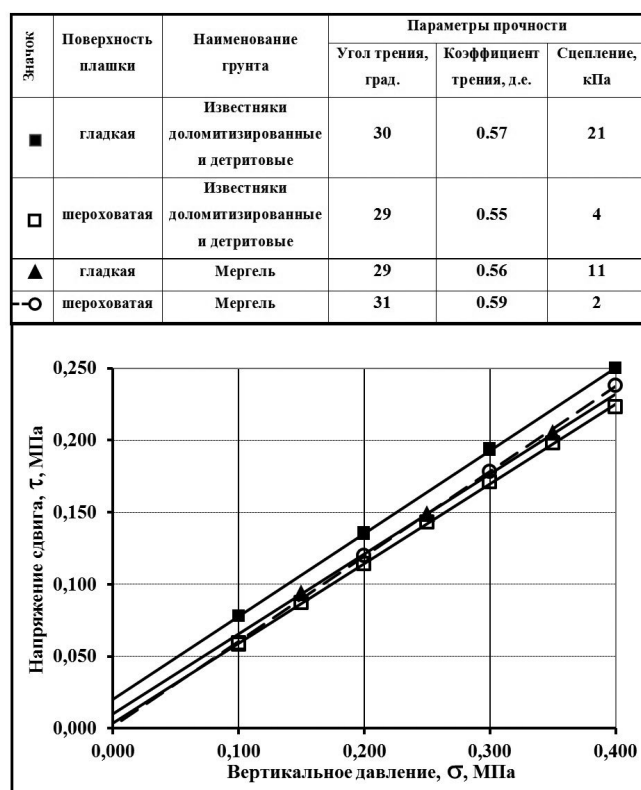


Рис. 4. Параметры прочности на сдвиг гладких и шероховатых плашек из цементного материала по образцам скальных пород.

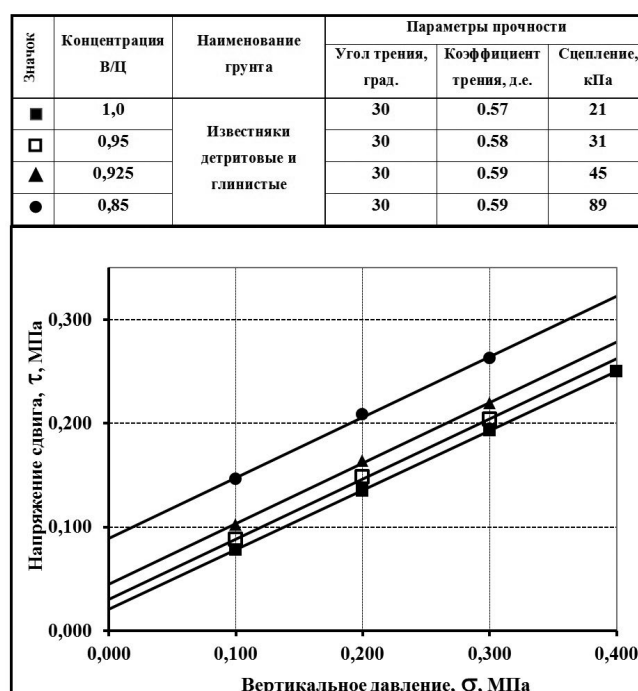


Рис. 5. Параметры прочности на сдвиг плашек из цементного материала, твердеющего в среде вмещающих пород (известняков детритовых и глинистых).

В испытаниях серий III и IV моделировалось взаимодействие грунтов (известняков детритовых и глинистых) с материалом свай в процессе его твердения в среде вмещающих пород. Такие условия взаимодействия дают существенный прирост структурной связности системы “грунт–материал свай”. Так, уже после твердения раствора с водцементным соотношением В/Ц = 0.85–0.95 обнаруживается значительное повышение величины предельных напряжений сдвига, что наглядно иллюстрирует рис. 5. При этом структурная связность системы возрастает до 31–89 кПа, при сохранении постоянными значений коэффициента трения $k \approx 0.60$.

Дальнейшее повышение концентрации вяжущего обуславливает увеличение предельных напряжений сдвига. Закономерности этих изменений были изучены в испытаниях на срез при нормальном к плоскости сдвига давлении $\sigma = 0.1$ МПа.

В процессе среза развитие относительных деформаций сдвига ε композитных моделей с разной концентрацией вяжущего характеризуется тремя выраженными этапами (рис. 6). Каждый из них может быть охарактеризован присущими ему значениями модуля деформаций сдвига $E_{сд}$:

$$E_{сд} = \Delta\tau / \Delta\varepsilon,$$

где $\Delta\varepsilon$ – изменение относительных деформаций сдвига в интервале линейной аппроксимации зависимости от τ ; $\Delta\tau$ – изменение напряжений сдвига в соответствующем интервале, [МПа].

Для наиболее низких концентраций вяжущего ($V/C = 1.00-0.96$) на этапе А происходит мобилизация сил сопротивления сдвигу, накопление деформаций вплоть до предельных, после чего наступает разрушение. Характерный модуль деформаций сдвига составляет 4.1–4.7 МПа.

На этапе Б с концентрациями вяжущего $V/C = 0.925-0.2$ значения $E_{сд}$ уменьшаются до 2.1–3.1 МПа. Это связано с перестройкой во времени структуры контакта твердеющего раствора и грунта, закрытием дефектов и микротрещин, возникающих ввиду недостаточной пластификации раствора с повышенной концентрацией вяжущего. Наконец, на этапе В значения $E_{сд}$ закономерно возрастают (5.0–21.1 МПа) и вписываются в общую закономерность зависимости $E_{сд} = f(V/C)$ в купе со значениями $E_{сд}$ этапа А.

Испытания в сериях III и IV показали, что напряжения сдвига при разрушении τ закономерно возрастают с увеличением концентраций вяжущего в цементном материале, твердеющем в среде вмещающих пород (рис. 7).

При наибольшей концентрации вяжущего ($V/C = 0.2$) напряжение сдвига в опытах составляло 0.74 МПа (кривая 1), но не превышало значений сдвиговой прочности грунтового материала

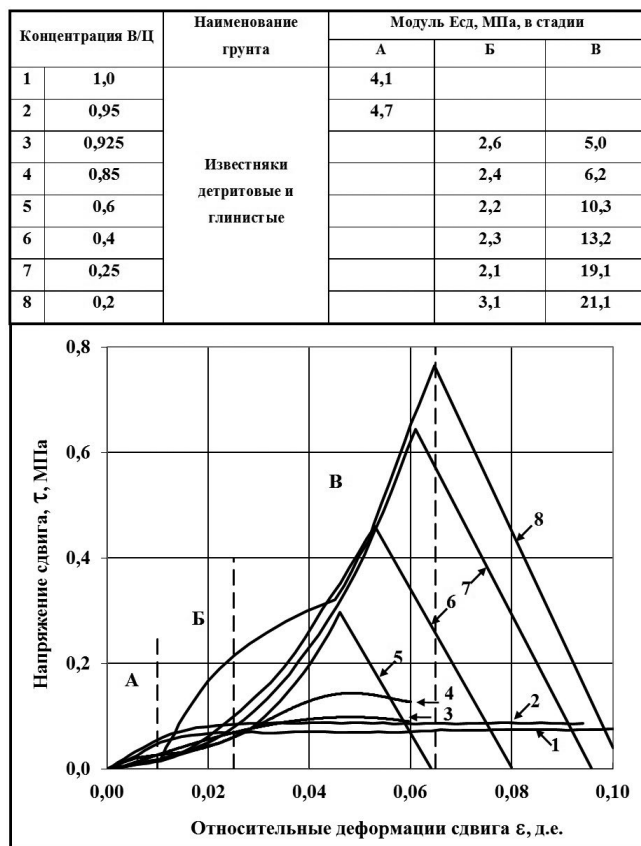


Рис. 6. Диаграммы соотношений относительных деформаций сдвига ϵ и напряжений сдвига τ в зависимости от концентрации вяжущего.

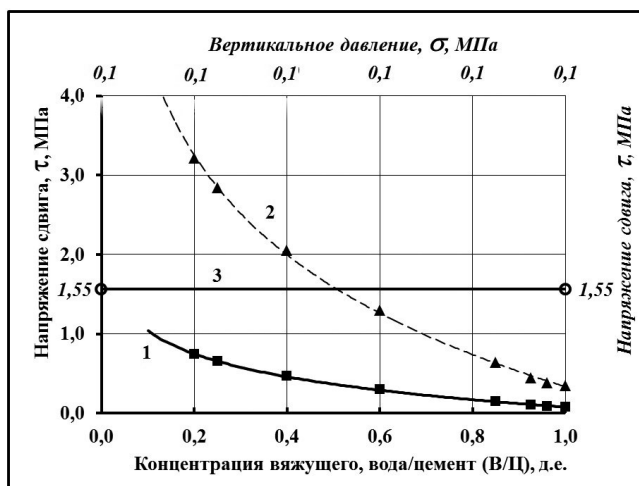


Рис. 7. Диаграммы соотношений относительных деформаций сдвига ϵ и напряжений сдвига τ при разрушении в зависимости от концентрации вяжущего (1 – данные экспериментов; 2 – прогноз после окончания твердения; 3 – линия предельных напряжений сдвига для известняков при $\sigma = 0.1$ МПа).

$\tau = 1.55$ МПа (для известняков детритовых и глинистых при той же нагрузке $\sigma = 0.1$ МПа) (линия 3). Необходимо упомянуть, что, обычно, при анализе оперируют расчетной прочностью, которая достигается после оптимального времени твердения композитной модели. Прогноз расчетной прочности, выполненный на основе таблицы 2 СП 82-101-98 “Приготовление и применение растворов строительных”, показан на рис. 7 кривой 2.

Сопоставление результатов прогноза со сдвиговой прочностью вмещающей породы показывает, что на определенном этапе твердения структурная связность композитной модели “грунт – материал сваи” может превысить прочность породы.

Прогнозируемое достижение композитной моделью прочности известняка возможно уже при водоцементном отношении $V/C \approx 0.5$. Таким образом, сдвиговая прочность по боковой поверхности модели сваи в принятых условиях ($\sigma = 0.1$ МПа) может составить ~ 1.55 МПа при установленном в опытах и упомянутом выше коэффициенте трения $k \approx 0.60$ (при $\phi_s = 30^\circ$).

Исследования композитных грунтовых систем [8] показывают, что итоговые характеристики определяются сложным сочетанием свойств и соотношения долей компонентов. В рассматриваемых экспериментах вклад составляющих трудно оценить ввиду неопределенности относительно характера и глубины области проникновения вяжущего. В первом приближении, по мере твердения материала в среде вмещающих пород, предельной можно принять наименьшую сдвиговую прочность одного из компонентов.

Более детальное изучение по методикам, описанным в [8], может послужить направлением дальнейших исследований.

В целом, результаты испытаний в сериях I и II подтверждают предположение, согласно которому при совпадении направления плоскости контакта разнородных компонентов с направлением принудительного смещения прочность на срез определяется по слабому слою. В выполненных сериях испытаний маркирующим элементом композитных моделей в сопоставлении параметров прочности послужил материал плашек, коэффициент трения которого составил $k \approx 0.60$ ($\varphi_s = 30^\circ$).

Формализуя сказанное, для скальных пород и песков, угол трения φ которых заведомо превышает 30° , можно принять сдвиговую прочность τ , равной:

$$\tau = 0,60 \cdot \sigma + R_c \quad (1)$$

где σ — давление, нормальное к плоскости сдвига, [МПа]; R_c — наименьшее значение прочности на сжатие или сцепления одного из компонентов, [МПа]; 0.60 — коэффициент трения материала плашек, полученный в экспериментах.

Для пылевато-глинистых грунтов при сдвиге плашек с шероховатой поверхностью параметрами прочности можно принять значения угла, т.н. внутреннего трения, и сцепления, характерные для этих пород и определяемые их составом и физико-химическими особенностями.

Адгезионные характеристики определяют сцепление материала гладкой поверхности свай с водонасыщенными пылевато-глинистыми грунтами и в определенных интервалах значений влажности проявляются как липкость. Трение в этих условиях характеризуется коэффициентами, отражающими физическую сущность грунтов. Для глинистых грунтов, содержащих наиболее тонкие частицы, угол трения составляет $\varphi_s \approx 22^\circ$, для песчано-пылеватых $\sim 26^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка напряжений сдвига при взаимодействии грунтовых массивов с поверхностью строительных конструкций и инъекционных жил, выполненных из цементного материала, весьма актуальна. В частности, она особенно важна для свайных фундаментов глубокого заложения (более 40 м), расположенных в дисперсных грунтах, а также подчас прорезающих скальные породы. Особенности взаимодействия определяются: материалом и характером поверхности, обводнением, взаимопроникновением материала свай и вмещающих пород.

Для экспериментальных исследований особенностей взаимодействия цементного материала с вмещающими грунтами разработаны специальные методики исследований прочности

на срез композитных моделей “грунт—материал свай”, представляющих собой цементные плашки, контактирующие с грунтом. Методики содержат процедуры подготовки и проведения испытаний на сдвиг по грунту плашек из материала свай с гладкой или шероховатой поверхностью в условиях обводнения. Кроме того, для скальных пород разработана методика подготовки и испытания моделей, в которых твердение раствора с различной концентрацией вяжущего происходило во вмещающем грунте.

Подтверждается, что характеристики прочности композитной модели, имеющей контактную поверхность, совпадающую с направлением сдвига, определяются компонентом, обладающим наименьшими характеристиками.

Результаты испытаний в разных условиях маркируются коэффициентом трения цементных плашек ($tg\varphi_s = 0.60$ д.е.), который оказался ниже соответствующих значений для песков и скальных пород, и выше — для дисперсных грунтов.

Для скальных пород и песков, угол трения φ которых заведомо превышает 30° , предложено определять сдвиговую прочность τ по ф. (1), в которой σ моделирует давление на соответствующей глубине прорезаемой толщи, величина прочности на сжатие R_c — соответствует контактному сцеплению C при $\sigma = 0$, а коэффициент трения материала $tg\varphi_s$ составляет 0.60 д.е.

Анализ значений контактного сцепления показал, что для дисперсных пылевато-глинистых грунтов, при сдвиге шероховатых плашек реализуются когезионные, т.е. значения, т.н. угла внутреннего трения, и сцепления, характерные для этих пород и определяемые их составом и физико-химическими особенностями.

Для гладкой поверхности свай возможны адгезионные условия взаимодействия, которые в определенных интервалах значений влажности проявляются как липкость. Углы трения, полученные для гладких поверхностей плашек и отражающие физическую сущность трения частиц, слагающих грунты, составляют для глин $\varphi_s \approx 22^\circ$, для песчано-пылеватых грунтов $\sim 26^\circ$.

При сдвиговых испытаниях моделей, цементный материал которых твердеет во вмещающем грунте, выделены 3 этапа развития деформаций сдвига в зависимости от концентрации вяжущего. При этом промежуточный этап Б, очевидно, связан с закрытием дефектов и микротрещин, возникающих ввиду недостаточной пластификации раствора с повышенной концентрацией вяжущего. Этот этап важно учитывать при испытаниях свай, изготавливаемых в грунтовом массиве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деркач В.Н. Прочность касательного сцепления цементных растворов в каменной кладке. // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 3. С. 19–28.
2. Кутергин В.Н., Афонин А.П., Кальберген Р.Г. Комплексные исследования свойств грунтов оснований высотных сооружений // Уникальные и специальные технологии в строительстве. М.: ИГЭ РАН, 2006. № 1(4). С. 78–83.
3. Кутергин В.Н., Фролов С.И. Специальные лабораторные исследования свойств грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 10. С. 19–21.
4. Петрухин В.П., Шулятьев О.А. Геотехнические особенности проектирования и строительства высотных зданий в Москве // Рос. архит.-строит. энцикл. Т. XIII. Строительство высотных сооружений. М.: ФГУП «ВНИИТПИ», 2010. С. 360–378.
5. Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Научно-техническое сопровождение геотехнического проектирования и строительства высотных зданий. Мониторинг // Рос. архит.-строит. энцикл. Т. XIII. Строительство высотных сооружений. М.: ФГУП «ВНИИТПИ», 2010. С. 336–360.
6. Рекомендации по определению липкости грунтов в стационарных лабораториях и полевых условиях. ПНИИС Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1983. 32 с.
7. Шулятьев О.А. Фундаменты высотных зданий // Вестник ПНИПУ Строительство и архитектура. 2014. № 4. С. 202–244.
8. Kutergin V.N., Kal'bergenov R.G., Karpenko F.S., Merzlyakov V.P. Deformation properties of the "voskresensky shale" composite series // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. Т. 52. № 6. P. 335–342.

ASSESSING INTERACTION BETWEEN THE COMPONENTS IN THE SOIL–CEMENT COMPOSITE MODEL

V. N. Kutergin^{a, #}, F. S. Karpenko^a, S. I. Frolov^a

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#]*E-mail: kvan20@bk.ru*

Soil massifs have close contact with foundations, piles, enclosing and fixing structures (anchors, dowels, retaining walls), as well as reinforcing soil during grouting with injection veins. Many bodies are composed of hardening cement that has an interfacial boundary with the soil. The soil–material system can be considered as a composite, in which the components exhibit new qualities when interacting. Experimental studies of cement interaction with enclosing fine soil and hard rock have been performed. The interaction specifics controlled by the material, the concentration of the binder, the surface type, watering, as well as mutual penetration of cement and enclosing rocks are studied. Special methods of shear testing based on soil samples of pile models made of cement material have been developed. The results of studying the effect of smooth and rough surfaces upon waterlogging are presented; the values of friction coefficients, contact cohesion, and stickiness are given. A dependence is proposed for determining the limit shear stresses of composite models upon the contact between sands and hard rocks with the material of dies. For rocks in which the hardening of the pile material was modeled, the values of the limit stresses and shear strain modulus were obtained depending on the binder concentration in the cement mortar.

Keywords: soils, cement material, piles, composite model, shear strength, coefficient of friction, contact cohesion, stickiness, binder concentration

REFERENCES

1. Derkach, V.N. [Tangential cohesion strength of cement mortars in masonry]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*, 2012, no. 3, pp. 19–28. (in Russian)
2. Kutergin, V.N., Afonin, A.P., Kal'bergenov, R.G. [Comprehensive studies of ground properties in the foundations of high-rise structures]. *Unikal'nye i spetsial'nye tekhnologii v stroitel'stve*. Moscow, IEG RAS, 2006, no. 1(4), pp. 78–83. (in Russian)
3. Kutergin, V.N., Frolov, S.I. [Special laboratory studies of soil properties]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2003, no. 10, pp. 19–21. (in Russian)
4. Petrukhin, V.P., Shulyat'ev, O.A. [Geotechnical features of the design and construction of high-rise buildings in Moscow]. In: [Russian architectural and building encyclopedia, vol. XIII. Construction of high-rise buildings]. Moscow, VNIINTPI Publ., 2010, pp. 360–378. (in Russian)
5. Petrukhin, V.P., Shulyat'ev, O.A., Mozgacheva, O.A. [Scientific and technical support for geotechnical design and construction of high-rise buildings. Monitoring]. In: [Russian architectural and building encyclopedia, vol. XIII. Construction of high-rise buildings]. Moscow, VNIINTPI Publ., 2010, pp. 336–360. (in Russian)
6. [Recommendations for determining the stickiness of soils in stationary laboratories and field conditions]. PNIIS Gosstroy USSR. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983, 32 p. (in Russian)
7. Shulyat'ev, O.A. [Foundations of high-rise buildings]. *Vestnik PNIPU Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4, pp. 202–244. (in Russian)
8. Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G., Karpenko, F.S., Merzlyakov, V.P. Deformation properties of the "voskresensky shale" composite series. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2016, vol. 52, no.6, pp. 335–342. (in Russian)