УДК 624.131

**О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГРУНТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ БЕТОННОЙ СВАИ**

**М.Б. Мариничев**,

кандидат технических наук, профессор кафедры Оснований и фундаментов,

Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар

**П.А. Ляшенко,**

кандидат технических наук, профессор кафедры Оснований и фундаментов,

Кубанский государственный аграрный, г. Краснодар

**В.В. Денисенко,**

кандидат технических наук, доцент кафедры Кадастра и геоинженерии,

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

тел. +7(995) 204-15-62, e-mail: [denvivi@yandex.ru](https://mail.yandex.ru/lite/compose?to=denvivi@yandex.ru)

*Предложена аналогия сопротивления грунта сдвигу по бетону в образце с трением грунта по боковой поверхности бетонной сваи. Сформулированы условия подобия приращений сопротивления, выявленных при испытании грунта методами постоянно возрастающей нагрузки и с постоянной скоростью деформации при непрерывном наблюдении за реакцией грунта. Анализ данных лабораторных испытаний показал единую природу сопротивления сдвигу грунта по бетону и грунта по грунту и причины различия их значений в указанных случаях.*

***Ключевые слова****: сопротивление грунта сдвигу, бетонная свая, боковая поверхность, постоянно возрастающая нагрузка, постоянная скорость деформации, условия подобия.*

Трение грунта играет существенную роль в работе висячей сваи, так как обеспечивает часть её сопротивления вдавливающей силе. Стандартное испытание сваи статической нагрузкой не позволяет точно определить эту часть. Лабораторное испытание модели сваи постоянно возрастающей нагрузкой (ПВН) с регистрацией осадки и нагрузки с шагом 0,005 мм дало зависимость осадки от вдавливающей силы, осложнённую частыми колебаниями скорости осадки. Эти колебания отражают частую смену механизма деформации и разрушения грунта основания. Тот же эффект наблюдается в опыте с заданной скоростью перемещения модели сваи: при перемещении с малой скоростью частые колебания испытывает сила сопротивления основания [1].

Впервые эффект циклического изменения сопротивления выявлен при испытании грунта на сдвиг в лабораторном опыте с малой постоянной скоростью деформации (ПСД) и непрерывной записью сопротивления образца грунта. Признано, что параметры сопротивления зависят от «эффективного диаметра частиц» [2].

Наши исследования показали, что оба метода испытания – с ПВН и с ПСД – при любом воздействии на грунт: сваей, зондом, сдвигом, компрессионным и одноосным сжатием − дают эффект циклического изменения реакции и отражают характеристики микроструктуры грунта [3, 4].

**Исследование трения грунта методом ПСД**

Исследование трения грунта по бетону проводилось методом ПСД в опыте с одноплоскостным сдвигом на автоматизированном сдвиговом приборе ВСВ-25А [5]. Сжимающая нагрузка прикладывалась рычажным нагрузочным механизмом, обеспечивающим постоянство приложенной нагрузки независимо от деформации сжатия образца грунта, cдвигающая – электромеханическим приводом с постоянной скоростью сдвига 2,5х10-6 м/с. Сопротивление образца  и деформация сдвига  регистрировались автоматически с шагом =0,005 мм деформации [4]. Сдвиг производили по площадке соприкосновения с бетоном пылеватого суглинка нарушенной структуры. Тот же грунт и при том же физическом состоянии испытывали методом ПСД на внутренний сдвиг − грунта по грунту. Сдвигающую нагрузку прикладывали к образцам после сжатия осевым давлением.

По данным испытаний получены зависимости сопротивления сдвигу от деформации сдвига при осевом давлении 100 кПа. Сопротивление внутреннему сдвигу больше, чем сдвигу грунта по бетону (рисунок 1).

Рисунок 1 – Зависимости сопротивления сдвигу грунта по бетону (1)

и грунта по грунту (2) от деформации сдвига образца

По сечению образца поверхность разрушения неоднородна: ближе к месту приложения силы поверхность разрушения вздыблена, в дальней − она имеет борозды, прочерченные в направлении сдвига. При сдвиге грунта по бетону борозды обнажают поверхность бетона.

Таким образом, поверхность разрушения является сложной, в общем, и как было показано ранее [6], формируется постепенно, по мере увеличения деформации сдвига.

**Анализ трения грунта по бетону**

Частая регистрация сопротивления и деформации выявила цикличность скорости изменения сопротивления . Это позволило выделить упругую  и неупругую  части деформации в каждом цикле: упругая на восходящей части цикла, т.е. при , неупругая – на нисходящей, т. е. при  [1]. Обе части циклов нормализуем, введя относительные приращения сопротивления:  и , где  и − приращения в цикле сопротивления упругой и неупругой деформации, а  и − соответствующие им значения упругой и неупругой частей деформации сдвига.

Рассмотрим распределение значений  по оси деформаций (рисунок 2*а*). Они все положительны. При малых деформациях примерно одинаковы и равны, в среднем, =34,5 кПа/мкм с коэффициентом вариации =0,25 (таблица). Значения  практически все равны нулю. По этим признакам выделяем 1-ю стадию сопротивления сдвигу грунта по бетону. Она характеризуется тем, что:

1) образец начинает разрушаться с начала нагружения деформацией сдвига и участки разрушения чередуются с участками упругого сопротивления. Средняя длина участка упругой деформации =9,9 мкм, средняя длина участка неупругой деформации (разрушения) =10,9 мкм (таблица);

2) относительные приращения неупругого сопротивления образца равны нулю, что указывает на пластическое разрушение.

2-я стадия сопротивления начинается падением неупругого сопротивления  и последующим резким всплеском приращения упругого сопротивления (рисунки 2*а* и 2*б*). Затем наблюдаются рост значений , которые проходят через максимум на протяжении 2-й стадии, и нулевые значения . В конце 2-й стадии  и .

Рисунок 2 – Зависимости от деформации сдвига образца относительных приращений

сопротивления сдвигу грунта по бетону: *а*) упругого; *б*) неупругого; *в*) сумм приращений

По-видимому, всплеск  отражает образование трещин отрыва, после которого необходимо большое значение  для восстановления равновесия сил в изменившемся образце. Далее происходит упрочнение грунта на поверхности бетона. Пластические деформации грунта на локальных площадках повышают сопротивление на них. При этом увеличивается общая жёсткость образца, поэтому относительные приращения сопротивления существенно различаются: в среднем (таблица). Физическая поверхность сдвига отклоняется от номинальной плоскости сдвига, заданной прибором.

Таблица – Средние значения приращений сопротивления и деформации

сдвига в упругой и неупругой частях цикла

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Стадии | , кПа/мм | , кПа/мм | , мкм | , мкм |
| Сдвиг грунта по бетону | | | | |
| 1-я стадия | 34,5 | 2,9 | 9,9 | 10,9 |
| 2-я стадия | 59,5 | 13,4 | 8,8 | 10,8 |
| 3-я стадия | 9,4 | -28,8 | 24,4 | 19,2 |
| Сдвиг грунта по грунту | | | | |
| 1-я стадия | 64,1 | 3,7 | 7,9 | 7,5 |
| 2-я стадия | 92,6 | 25,6 | 9,6 | 11,3 |
| 3-я стадия | 14,1 | -44,9 | 21,1 | 17,6 |

В 3-й стадии все приращения неупругого сопротивления отрицательны , а приращения упругого сопротивления почти все равны нулю: . Происходит разупрочнение грунта вследствие образования большого числа трещин отрыва, что ослабляет образец в целом. Потери упругого сопротивления здесь уже не восстанавливаются из-за возросшего объёма разрушений, а граничные условия не ограничивают деформацию сдвига образца. Неупругое сопротивление уменьшается вследствие сокращения площадок скольжения и увеличения открытой части трещин.

Исходя из предложенной модели, в 1-й стадии сопротивление образца сдвигу можно рассматривать на основе решений теории упругости для его первоначальной формы, но с поцикловым изменением значений первоначальных граничных условий. Эти решения пригодны только для упругой части циклов. Во 2-й стадии необходимо учитывать возрастающую жёсткость грунта в зоне сдвига и увеличение площадок скольжения. Для этого нужно знать геометрию площадок и описать её измеряемыми параметрами. Во 2-й стадии сопротивления грунт может эксплуатироваться безопасно для конструкции до достижения максимума . В 3-й стадии образец грунта близок к разрушению, в общем, поверхностями скольжения и трещинами отрыва настолько, что в конце её становится неэквивалентным начальному.

**Сравнение трения грунта по бетону с внутренним трением грунта**

Данные испытания грунта по грунту показывают, что внутреннее трение подчиняется тем же закономерностям, что и трение грунта по бетону. Так же скорость изменения сопротивления грунта сдвигу изменяется циклически, что позволяет выделить упругую и неупругую части сопротивления образца (рисунки 3 и 4). Приращения сопротивления обеих частей так же проходят стадии изменений по тем же признакам, что описаны в предыдущем разделе.

Рисунок 3 – Зависимость скорости изменения сопротивления сдвигу

грунта по грунту от деформации сдвига образца

Рисунок 4 – Зависимости от деформации сдвига образца относительных приращений

сопротивления сдвигу грунта по грунту: *а*) упругого; *б*) неупругого; *в*) сумм приращений

В обоих случаях, разрушение сдвигом происходит по грунту, только в первом – внутри образца, а во втором – вблизи жёсткой бетонной поверхности. Это порождает различие в результатах, наиболее существенным из которых является значение сопротивления сдвигу: в первом оно выше, чем во втором (рисунок 1). Причины этого различия в следующем.

В обоих случаях образцы для опытов формировались путём компрессионного сжатия в кольце прибора. Оно порождает разрушение микроструктуры грунта поверхностями скольжения, пронизывающими образец от одного штампа прибора до другого. Вблизи жёстких штампов сеть поверхностей скольжения достигает наибольшей густоты [4], поэтому поверхность разрушения сдвигом вблизи штампов более сглажена, чем в средней части образца, и имеет меньшую суммарную площадь.

При сдвиге грунта по бетону бетонная вставка играет роль штампа в компрессионном сжатии, и площадки скольжения вблизи него более сглажены, чем внутри образца при сдвиге грунта по грунту. Это видно из сравнения средних значений  и  для 1-й стадии сопротивления грунта по бетону и грунта по грунту (таблица):  и , где индекс  обозначает сдвиг грунта по бетону, индекс  − грунта по грунту. Но , причём разница более существенна, чем для перемещений. Следовательно, определяющим фактором сопротивления является соотношение площадей поверхностей разрушения:

, (1)

где  и – приращения площади поверхностей разрушения сдвигом грунта по бетону и грунта по грунту, соответственно.

Естественно предположить, что для одного и того же грунта сопротивление сдвигу по площадкам разрушения одинаково и равно . Тогда получаем отношение сил сопротивления сдвигу:

. (2)

Из таблицы видно, что во 2-й стадии отношение  больше, чем : 1,91 против 1,05.

Разрушение по меньшим площадкам требует меньших упругих напряжений, чем по крупным, поэтому

 , (3)

и разрушение грунта сдвигом с начала нагружения идёт вблизи боковой поверхности сваи [1]. Однако отношение значений величин в (3) значительно меньше, чем в (2): , а отношение  мало отличается от . Это указывает на важную роль размеров площадок разрушения, которые зависят, в свою очередь, от параметров неоднородности микроструктуры грунта [3], одинаковых в обоих испытаниях.

**Применение метода ПВН к расчётам висячей сваи**

Опыт с образцами грунта и бетона проведён в условиях, аналогичных условиям вблизи поверхности сваи: сдвиг грунта по бетону происходит при постоянной прижимающей силе и с постоянной (на этапе нагружения сваи) скоростью деформации. Лабораторный опыт необходим для измерения характеристик грунта при его работе вблизи бетонной поверхности, но не может в полной мере её моделировать. Модель может быть использована для определения взаимодействия сваи с грунтом, если в ней используется тот же грунт, что и в реальном объекте, и она геометрически подобна объекту.

Разделение сопротивления грунта на упругую и неупругую части позволяет сформулировать условия подобия объекта и его модели [4]. Для этого основание модели должно быть испытано статической нагрузкой методом ПСД (или ПВН) с непрерывной регистрацией его реакции, что необходимо для выявления циклов изменения реакции и их интерпретации. Наилучший результат дало бы испытание пробной сваи в месте будущего основания реальных свай [7].

Для упругой части -го цикла условие подобия основывается на уравнениях теории упругости и для грунта вблизи боковой поверхности в 1-й стадии сопротивления сваи [8] имеет вид:

 , (4)

где  и – диаметры реальной сваи и её модели, соответственно.

Условие подобия приращений неупругого сопротивления выражает равенство силы вязкого трения на площадке скольжения единичной площади:

 , (5)

где  и – площади поверхности скольжения в основаниях реальной сваи и её модели, соответственно, оказывающих сопротивление в -м цикле.

Сочетание упругих решений с моделированием пластического упрочняющегося по циклам состояния основания даёт оценку сопротивления грунта по боковой поверхности сваи и инструмент для варьирования параметров фундамента. Сопротивление в 1-й стадии вычисляется по формуле:

 , (6)

где  и  − сопротивление грунта по боковой поверхности сваи после -го цикла в 1-й стадии сопротивления.

**Заключение**

Лабораторное испытание образцов грунта на сдвиг с постоянной скоростью деформации (ПСД) и непрерывной регистрацией сопротивления грунта позволяет получить данные для анализа взаимодействия грунта и бетона вблизи бетонной поверхности сваи. Сопротивление грунта изменяется циклически, отражая чередование упругого и неупругого механизмов. В ходе испытания можно оценить параметры изменения и характеристики грунта.

Эта методика открывает возможность моделирования работы боковой поверхности сваи в грунте. Для соблюдения условий подобия модель сваи должна быть геометрически подобна реальной свае и испытываться в реальном грунте методом ПСД с непрерывной регистрацией сопротивления или методом ПВН с непрерывной регистрацией осадки модели сваи.

***Литература*:**

1. Ляшенко П.А., Денисенко В.В., Мариничев М.Б. Исследования работы оснований буронабивных свай // Строительство: новые технологии, новое оборудование, № 7, 2019. – С. 18-23.

2. Покровский Г.И. Исследования по физике грунтов. – М.-Л.: Гл. ред. строит. лит., 1937.

3. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Исследование грунтов методом постоянно возрастающей нагрузки. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – 189 с.

4. Патент на изобретение РФ № 2280852, G01N 3/42. Способ испытания грунтов / Ляшенко П.А., Денисенко В.В., Кравченко Э.В. // Изобретения. Полезные модели, 2006, № 21.

5. Денисенко В.В., Ляшенко П.А., Горячев М.И., Дорошенко Г.И. Автоматический срезной прибор с заданной скоростью среза // Научно-технические достижения и изобретения, рекомендуемые для использования в строительстве. Информационный сборник. – М.: ВНИИИС, 1988, № 7. – С. 58-61.

6. Matthews M.C. The engineering application of direct and simple shear testing // Ground Engineering, v. 21, № 2, 1987. – Р. 13-21.

7. Ляшенко П.А., Денисенко В.В., Мариничев М.Б. Обобщенные характеристики работы буронабивных свай в глинистых грунтах // Строительство: новые технологии – новое оборудование, № 5 (185) 2019. – С. 24-30.

8. Ляшенко П.А., Денисенко В.В., Мариничев М.Б. Схема работы под нагрузкой буронабивных свай в глинистых грунтах // Строительство: новые технологии – новое оборудование, № 8 (188) 2019. – С. 34-40.

M.B. MARINICHEV, P.A. LYASHENKO, V.V. DENISENKO

***ON INTERACTION OF SOIL WITH SURFACE OF CONCRETE PILES***

*An analogy of soil resistance to shear along concrete in a sample with soil friction along the lateral surface of a concrete pile is proposed. The conditions of resemblance of the increments of resistance identified during the testing of the soil by the methods of constantly increasing load and with a constant strain rate during continuous monitoring of the soil reaction are formulated. Analysis of laboratory test data showed a unified nature of resistance to shear of soil in concrete and soil in soil and the reasons for the difference in their values ​​in these cases.*

***Key words:*** *soil resistance to shear, concrete pile, lateral surface, constantly increasing load, constant strain rate, similarity conditions.*