**УДК 624.131.37:624.131.43**

# НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С УЧЁТОМ СКОРРЕКТИРОВАННОГО ЗНАЧЕНИЯ РАСЧЁТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ

***Т.М. УЛАСИК***
***(Белорусский национальный технический университет, Минск)***

*Одним из факторов, повышающим несущую способность фундаментов глубокого заложения, является дилатансия несвязного грунта. Условия, при которых будут возникать дилатантные напряжения, изначально определяются не только способом устройства фундамента, но и геологическими условиями основания, например, его слоистостью. Вне зависимости от того, являются ли условия работы фундамента «стесненными» или соответствуют схеме свободного дилатирования, всегда имеет место мобилизация прочности грунта, связанная с явлением дилатансии. Использование разработанных автором табличных значений расчётных сопротивлений несвязных грунтов (с учётом дилатантной составляющей сдвига несвязного грунта) на боковой поверхности забивных свай и свай-оболочек для соответствующих значений начального коэффициента пористости массива грунта ведёт к повышению точности расчётов несущей способности по 1-й группе предельных состояний (по несущей способности грунта основания).*

**Введение.** Современное фундаментостроение ставит перед механикой грунтов ряд задач, не находящих необходимого решения. При испытаниях фундаментов глубокого заложения буровых и инъекционных свай, анкеров, армированного грунта обнаруживаются значения контактного трения и сопротивления вдавливанию, существенно отличающиеся от вычисленных теоретически и определенных лабораторными испытаниями. Многие исследователи в связи с этим обратили внимание на дилатансию, как возможную причину столь значительных расхождений. Так, Д.Ю. Соболевским сформулированы основные принципы учета дилатансии, выявлено ее влияние на мобилизуемую прочность грунта. Прочность грунта рассматривается как функция условий его разрушения. Соответственно параметры прочности при разных условиях разрушения, у одного и того же грунта будут различны. Данная проблема нуждается в детальном исследовании в части уточнения методов определения параметров прочности дилатирующих грунтов: конструкций приборов, способов приложения нагрузок, методик отображения результатов. Последние регулируются нормами, устанавливаемыми государством. В Республике Беларусь такими нормами являются СТБ (стандартные требования Беларуси). Созданные на основе ГОСТ стандартные требования регламентируют различные вопросы, касающиеся определения характеристик грунтов, поэтому для отображения результатов сдвиговых испытаний с учетом явления дилатансии необходимы специальные требования, методики, выполнение которых позволило бы качественно и количественно оценить проявление дилатансии. Необходимость такого документа продиктована, во-первых: отсутствием в практике фундаментостроения использования методик определения параметров прочности грунтов с учетом условий стеснения деформирования; во-вторых, существенными различиями, обнаруживающимися при попытках расчета конструкций глубоких фундаментов на основе теории прочности Кулона-Мора. В исследованиях, проведенных профессором Д.Ю. Соболевским, резервом повышения несущей способности и эффективности фундаментов глубокого заложения названа «стеснённая» дилатансия несвязного грунта. Различные несвязные грунты, залегающие от поверхности по длине сваи, анкеры будут по-разному реагировать на передачу нагрузки и, следовательно, значения дилатантных напряжений и соответствующих им перемещений $\delta$ в этих грунтах будут различными. Для случая работы сваи, анкера на выдергивающую нагрузку знак дилатантных перемещений изменится, и $\delta$ будет больше нуля, что соответствует дилатансии; $\delta < 0$ соответствует контракции несвязного грунта. Отсутствие дилатантных перемещений ($\delta = 0$) и соответствующих им напряжений отражает такое состояние несвязного грунта, которое соответствует критической плотности. В проведенных нами опытах (с использованием дилатометрического прибора контактного сдвига) было отмечено, что нормальное давление при приложении сдвигающего усилия после этапа контракции на нескольких ступенях оставалось постоянным, и только потом начинался рост нормального давления, соответствующий дилатансии. Отсутствие изменения объемных деформаций при $\delta_2 = 0$ характерно для грунта с некоторой постоянной на этот момент плотностью, названной Д.Ю. Соболевским «начальной критической плотностью при данном уровне напряжений». Вышеописанная модель контактного сдвига будет справедлива и для однородного основания, разница будет только в значениях дилатантных перемещений. Такое дополнение модели контактного сдвига позволяет реально оценить условия работы фундаментов глубокого заложения, а также факторы увеличения несущей способности с учетом особенностей поведения несвязных грунтов для различ-

ных случаев дилатирования. Проведенные нами исследования доказали возможность моделирования условий стеснения дилатансии, возникающих по контактной поверхности фундамента и массива грунта в лабораторных условиях.

**Определение несущей способности защемлённых в грунте забивных свай всех видов.** Согласно нормативным документам [1] расчёт несущей способности забивной сваи ($F_d$), кН, работающей на сжимающую нагрузку, следует определять как сумму сил расчетных сопротивлений грунтов основания под нижним концом сваи и на ее боковой поверхности по формуле:

$$F_d = \gamma_c(\gamma_{cr}RA + \Sigma U_i\gamma_{cf}h_iR_{fi}), \quad (1)$$

где $\gamma_c$ – коэффициент условий работы сваи в грунте; $R$ – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа, принимаемое по таблице; $A$ – площадь опирания на грунт сваи, м$^2$, принимаемая по площади поперечного сечения сваи брутто; $U_i$ – усредненный периметр поперечного сечения ствола сваи в $i$-м слое грунта, м; $R_{fi}$ – расчетное сопротивление (прочность) $i$-го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи, кПа; $h_i$ – толщина i-го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м; $\gamma_{cr}$, $\gamma_{cf}$ – коэффициенты условий работы грунта соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи, учитывающие влияние способа погружения сваи на расчетные сопротивления грунта.

Прежде чем перейти непосредственно к расчёту несущей способности забивной сваи, нами были проведены испытания несвязных грунтов (песков мелких, средних, крупных) на дилатометрическом приборе контактного сдвига с применением модели контактного сдвига [2]. Основное допущение, принятое за основу в модели контактного сдвига заключается в следующем: вся область деформаций грунта разделяется на зоны упругих и пластических деформаций.

В основу модели контактного сдвига, соответствующей феноменологической модели, включены следующие положения:

- коэффициент упругого отпора (равномерного сжатия) массива грунта $K$ характеризует его упругие свойства и связан соотношением дилатантных перемещений $\delta_d$ и дилатантного распора $\Delta\sigma_d$:

$$\delta_d = \Delta\sigma_d/K; \quad (2)$$

- разрушение грунта при сдвиге локализовано в полосе непосредственно вдоль контактной поверхности.

Поскольку нами была использована уточнённая методика испытаний несвязного грунта, в которой учитывается объёмное стеснение деформаций в зоне сдвига, это позволило учесть явление дилатансии при определении параметров прочности грунта. Уточнённая методика испытаний несвязного грунта позволяет определять дилатантные напряжения и оценить дилатантные перемещения, в отличие от традиционной методики сдвиговых испытаний несвязных грунтов. Названная методика применима для условий «стеснённого» свига. Соответственно предельные сдвигающие напряжения $\tau_u$ в опытах прямо пропорциональны действующему нормальному давлению $\sigma_{no}$ и определялись по формуле:

$$\tau_u = (\sigma_{no} + \Delta\sigma_d)\cdot \mathrm{tg}\varphi, \quad (3)$$

где дилатантная составляющая сдвига $\tau_d$ зависит от дилатантного распора:

$$\tau_d = \Delta\sigma_d\cdot \mathrm{tg}\varphi. \quad (4)$$

Дилатантные напряжения неотъемлемо связаны с дилатантными перемещениями и упругими деформациями, происходящими в исследуемом грунте. Дилатантные перемещения для условий «стесненной» дилатансии, определенные нами при испытании песка крупного, среднеоднородного ($U_{max}$ = 6,28), довольно незначительны и составляют $\delta_d$ = 0,14 мм, $\sigma_o$ = 0,1 МПа; $\delta_d$ = 0,19 мм, $\sigma_o$ = 0,2 МПа с коэффициентом упругого отпора $K$ = 420 МН/м$^3$. Соответствующие им дилатантные напряжения составили 0,05 и 0,075 МПА. Очевидно, что перемещения, составляющие доли миллиметров, вызывают значительный прирост нормального давления в плоскости сдвига. В момент сдвига, как известно, грунт достигает определенной или «критической» плотности. И то, насколько близкой будет плотность грунта от начала испытания к «критической», определит дальнейшее поведение исследуемого образца. Нами отмечен тот факт, что в опытах на сдвиг несвязных грунтов при различных значениях нормального давления в диапазоне 0,1 – 0,5 МПа предельные сдвигающие напряжения могут возникать как на этапе контракции, так и на этапе дилатансии. Передача изменяющихся в ходе сдвига напряжений происходит через контакты зерен несвязного грунта, поэтому будет иметь значение не только количество контактов, но и минеральный состав зерен грунта, равно как и их размеры. Для дальнейших исследований на дилатометрическом приборе контактного сдвига (ДПКС) нами был выбран грунт, зерна которого представлены различными ми-

нералами: кварц, полевые шпаты, мелкие обломки гранита и др. Для песка крупного повышенной неоднородности значения дилатантных напряжений уменьшаются с увеличением $e_o$ для испытаний при одном и том же коэффициенте упругого отпора $K$; с уменьшением значений $K$ дилатантные напряжения изменяются от 153 до 75 кПа для наименьших значений $e_o$ и от 34 до 18 кПа для наибольших значений $e_o$. Подобная закономерность изменения дилатантных напряжений прослеживается и для песка средней крупности среднеоднородного и для песка мелкого однородного. Для песка среднего, среднеоднородного максимальное значение дилатантных напряжений при наибольшем значении $K$ = 680 МН/м$^3$ составляет 130 кПа при $e_o$ = 0,4. При этом же коэффициенте пористости, но для $K$ = 250 МН/м$^3$ дилатантное напряжение для песка среднего составляет 81 кПа. Для песка мелкого однородного с теми же начальными физическими параметрами дилатантное напряжение еще меньше – от 108 кПа при $K$ = 680 МН/м$^3$ и до 67,5 кПа при $K$ = 250 МН/м$^3$. Очевидно, что для более крупного грунта значения дилатантных напряжений больше, чем более мелкого. Увеличение стеснения объемных деформаций, выражаемое в увеличении коэффициента упругого отпора, приводит к закономерному росту дилатантных напряжений для конкретного вида грунта. В более плотном несвязном грунте дилатансия проявляется сильнее, чем в рыхлом. Приведенные графики (рис. 1) построены для условий испытаний при проявлении дилатансии, т.е. когда все зафиксированные дилатантные напряжения имеют знак плюс и при приложении сдвигающего усилия не наблюдается явление контракции или уплотнения песчаного грунта.

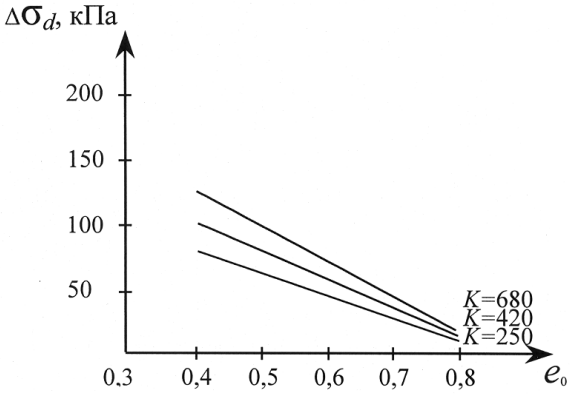


Рис. 1. Изменение дилатантных напряжений $\Delta\sigma_d$
в зависимости от начального коэффициента пористости $e_o$ песка средней крупности среднеоднородного
при различных значениях коэффициента упругого отпора $K$

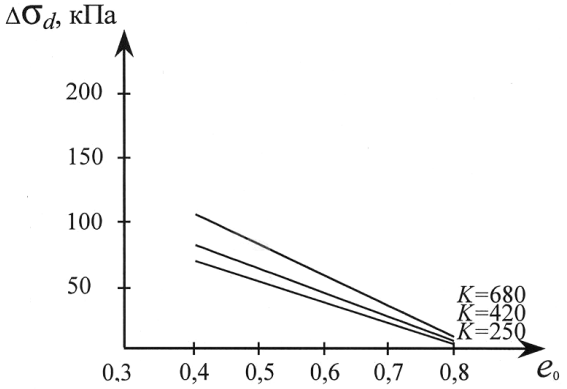


Рис. 2. Изменение дилатантных напряжений $\Delta\sigma_d$
в зависимости от начального коэффициента пористости $e_o$ песка мелкого
при различных значениях коэффициента упругого отпора $K$

Общий вид графиков изменения дилатантных напряжений в зависимости от начального коэффициента пористости $e_o$ для песка среднего характеризуется схожим расположением прямых дилатантных напряжений. Пользуясь этими графиками, можно количественно оценить величину дилатантных напряжений при сдвиге, а также рассчитать, насколько будут отличаться значения контактного трения, определенные с учетом дилатантных напряжений от определяемых на основе данных традиционных испытаний. Традиционно в механике грунтов угол внутреннего трения считается величиной постоянной для

конкретного вида грунта. Условия сдвига или разрушения, при которых определен угол внутреннего трения, обычно не учитываются. Когда проводят сдвиговые испытания с использованием стандартных методик, в этом случае моделируются условия сдвига вблизи поверхности грунта. Когда же сдвиг происходит по контакту тела сваи, анкера, тогда зона сдвига зажата между сдвигаемым телом и массивом грунта. В этом случае наблюдаются условия, которые можно моделировать с помощью дилатометрических приборов (специальных сдвиговых приборов). Поскольку деформация сдвига – это смещение одной части грунта относительно другой, вызванное действием касательных напряжений от внешней нагрузки [3], то при таком смещении неизбежно изменение высоты образца за счет явления дилатансии в плоскости сдвига. На подобное явление исследователи обращали внимание неоднократно, были зафиксированы эти незначительные перемещения (миллиметры и доли миллиметров), и в связи с такой незначительностью этими перемещениями пренебрегали. Причем для испытаний несвязных (сыпучих) грунтов приборы должны иметь неподвижную нижнюю часть.

Предлагаемые нами методики определения параметров прочности основаны, в том числе, и на учете этих незначительных перемещений, названных дилатансией. Процесс сдвига несвязного грунта, в условиях которого определяют значения сопротивления грунта сдвигу, хорошо моделируется с помощью специальных приборов, называемых дилатометрическими. Такими приборами являются дилатометрический прибор контактного сдвига и дилатометрический прибор плоского среза. Предельное состояние при сдвиге – незатухающее скольжение одной части несвязного грунта относительно другой – соответствует состоянию или состоянию исчерпания прочности. Именно в этот момент в зависимости от значения дилатантных перемещений $\delta_d$ и дилатантных напряжений $\Delta\sigma_d$ мобилизуется предельное сдвигающее усилие и его составная часть – дилатантная составляющая сдвига $\tau_d$. Действие внешней нагрузки на массив грунта может привести к нарушению прочности внутренних связей между зернами грунта. Это приведет к скольжению (смещению) зерен относительно друг друга. И поскольку сопротивление сдвигу внутри массива грунта зависит от ряда факторов (гранулометрический состав грунта, минеральное трение зерен, начальная плотность упаковки их, влажность, жесткость грунтового массива), необходимо максимально учесть вышесказанное. Прочностные характеристики [4], получаемые на основе испытаний грунтов на сдвиг (удельное сцепление $C$ и угол внутреннего трения $\varphi$), используются в расчетах прочности и устойчивости при проектировании оснований и фундаментов.

Проведенные нами исследования позволили в полной мере дать качественную и количественную оценку проявления дилатансии при контактном сдвиге, а также рассчитать скорректированные значения расчётного сопротивления $R'_{fi}$ песчаного грунта (песка среднего, среднеоднородного) на боковой поверхности забивных свай и свай оболочек с учётом явления дилатансии. Также были рассчитаны скорректированные значения $R'_{fi}$, приведенные в таблице, и для песков крупных, мелких. При этом оговаривается, что коэффициент пористости соответствует начальному напряжённому состоянию, а пласты грунтов при расчёте следует расчленять на однородные слои толщиной не более 2 м. В скобках указаны нормативные значения расчётного сопротивления $R_{fi}$, используемые в расчётах свай согласно П4-2000 к СНБ 5.01.01.-99.

Расчетные сопротивления песчаных грунтов
на боковой поверхности забивных свай и свай-оболочек с учетом дилатансии

| Средняя глубина расположения слоя грунта, м | Расчетные сопротивления i-го слоя грунтов на боковой поверхности забивных свай и свай-оболочек ($R'_{fi}$), кПа | | |
|---|---|---|---|
| | песчаного массива грунта с начальным коэффициентом пористости $e$= 0,5 | | |
| | крупных | средних | мелких |
| 1 | 102(55) | 90(45) | 70(40) |
| 2 | 106(60) | 94(55) | 77(50) |
| 3 | 110(65) | 98(60) | 84(55) |
| 4 | 115(70) | 103(63) | 91(58) |
| 5 | 119(75) | 107(68) | 97(61) |
| 6 | 124(80) | 112(72) | 103(63) |
| 7 | 129(85) | 117(75) | 106(65) |
| 8 | 134(90) | 122(77) | 109(66) |
| 9 | 139(92) | 127(77) | 112(67) |
| 10 | 144(93) | 132(79) | 115(68) |
| 12 | 149(95) | 137(80) | 118(69) |
| 15 | 154(97) | 143(82) | 120(70) |
| 20 | 159(99) | 149(85) | 123(72) |
| 25 | 164(100) | 153(90) | 125(74) |

Соотношение значения расчётного сопротивления с учётом дилатансии $R'_{fi}$ и $R_{fi}$ можно определить как коэффициент $k_{dil}$ с дальнейшим использованием его в расчётах несущей способности свай. Практические расчёты несущей способности сваи показывают, что несущая способность сваи, определённая для скорректированного значения расчётного сопротивления на боковой поверхности в несвязных грунтах, в среднем на 25 % выше, чем без учёта дилатансии.

Проведенные исследования несвязных грунтов на контактный сдвиг с учётом явления дилатансии позволяют сделать следующие **выводы:**

1) уточнённая методика испытаний несвязных грунтов при стеснении объёмных деформаций позволяет определить более точные значения параметров прочности при контактном сдвиге;

2) дилатантные распорные напряжения оказывают определённое влияние на моделируемое контактное трение, что не учитывается в традиционных методах испытаний и расчётов;

3) на развитие дилатантных напряжений при сдвиге существенное влияние оказывают начальные физические характеристики несвязного грунта;

4) уточнённые параметры прочности могут быть использованы в расчётах несущей способности свай при определении скорректированного значения расчётного сопротивления на боковой поверхности в несвязных грунтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование забивных свай. Пособие к строительным нормам Республики Беларусь: П4-2000 к СНБ 5.01.01.-99.
2. Соболевский, Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д.Ю. Соболевский. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.
3. Грунты. Методы лабораторного определения прочности и деформируемости: ГОСТ 12248-96.
4. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний: ГОСТ 20522-96.

*Поступила 24.11.2010*

**BEARING ABILITY OF THE PILE BASES WITH THE ACCOUNT OF THE CORRECTED VALUE OF SETTLEMENT RESISTANCE ON A LATERAL**

***T. ULASIK***

*One of the factors, raising bearing ability of the bases deep, is dilatancy an inconsistent ground. Conditions at which will arise dilatancy pressure, are initially defined not only way of the device of the base, but also geological conditions of the basis, for example, by its lamination. Without dependence from, whether base working conditions «constrained» are or correspond to the scheme free dilatancy, mobilisation of durability of a ground connected with the phenomenon dilatancy always takes place. Use of the tabular values of settlement resistance developed by the author inconsistent грунтов (with the account dilatancy a component of shift of an inconsistent ground) on a lateral surface забивных piles and piles-covers for corresponding values of initial factor of porosity of a file of a ground conducts to increase of accuracy of calculations of bearing ability on 1st group of limiting conditions (on bearing ability of a ground of the basis).*