

УДК 624.131

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БУРОИНЪЕКЦИОННОЙ СВАИ

Ляшенко Павел Алексеевич
к. т. н., профессор
Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Остапенко Александр Игоревич
инженер
ОАО «Краснодаргражданпроект», Краснодар, Россия

Приводится обоснование моделирования статической работы под нагрузкой буроинъекционной сваи и его реализация в лабораторной модели. Результаты испытания модели сваи сравниваются с данными полевых испытаний натуральных свай. Опытные и вычисленные на основе подобия значения несущей способности свай дают коэффициент корреляции 0,692. Эффект локального максимума «ускорения» осадки, обнаруженный ранее при анализе данных полевых испытаний, подтверждается испытанием модели. Точка максимума разделяет, предположительно, процесс сопротивления сваи на два этапа: преимущественного сопротивления на боковой поверхности и под пятой сваи

Ключевые слова: БУРОИНЪЕКЦИОННАЯ СВАЯ, ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОДОБИЯ, НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ, МАКСИМУМ «УСКОРЕНИЯ» ОСАДКИ СВАИ

UDC 624.131

LABORATORY MODELLING OF FILLING PILE

Liashenko Pavel Alekseevich
Cand. Tech. Sci., professor
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Ostapenko Aleksandr Igorevich
engineer
OAS "Krasnodargrahdanproekt", Krasnodar, Russia

The grounds of modeling of filling pile static resistance have been offered so as the results of its realization at the laboratory models. The laboratory testing data are compared with the data of field testing of natural piles. The experimental and the model calculated values of bearing capacity shows the correlation coefficient 0,692. The laboratory tests confirm the existence of the local maximum of the settlement "acceleration". The point of maximum proposed separates two stages of bearing capacity increment process: the stage of lateral surface mainly resistance and the stage of pile bottom mainly resistance

Keywords: FILLING PILE, LABORATORY MODEL, GROUNDS OF MODELING, BEARING CAPACITY, MAXIMUM OF SETTLEMENT "ACCELERATION"

Введение

Буровые сваи получают всё более широкое применение в строительстве. Разные виды буровых свай различаются формой, размерами и технологией изготовления. Все эти факторы влияют на несущую способность и деформации свай и свайных фундаментов [1]. При расчётах несущей способности эти различия учитываются нормами довольно грубо, с помощью эмпирических коэффициентов и по простейшей расчётной модели, не учитывающей многих особенностей работы грунта вокруг сваи. Например, то наблюдение, что предельное состояние грунта наступает одновременно вблизи боковой поверхности сваи и под нижним концом (пятой). «Ствол

сваи включается в работу сразу по мере роста внешней нагрузки, и только затем вступает в работу пята сваи...» [2].

Область предельного равновесия содержит следы сдвигов грунта, как внутри уплотненного ядра под нижним концом сваи, так и за пределами ядра.

«Форма и размеры предельной поверхности определены на основе экспериментальных исследований. В пределах длины сваи она идет по поверхности контакта сваи с грунтом, ниже она принимает форму усеченного конуса и замыкается снизу поверхностью, состоящей из боковой поверхности усеченного конуса и шаровой поверхности...

Следы плоскостей сдвига зафиксированы внутри ядра и по его границе, а также за пределами ядра. Выше подошвы сваи видна система параллельных следов коротких трещин отрыва, наклоненных под углом φ к вертикали. Часть следов, расположенная выше, образовалась при забивке сваи; нижние участки явились результатом статического нагружения, что говорит о единой природе сопротивления грунта в основании сваи воздействию статических и динамических нагрузок» [3, 4].

Поскольку здесь обсуждаются результаты статического нагружения, то эти наблюдения представляют интерес и для буровых свай. Однако построенная по результатам этих наблюдений расчётная модель не учитывает, в полной мере, отмеченные особенности. Как не учитывают их другие модели, основанные на наблюдении за осадкой сваи при ступенчатом увеличении нагрузки: осадка представляется в виде плавной монотонной зависимости от вдавливающей силы, которая задаётся с интервалом 20-200 кН. Такая технология испытаний и представление результатов:

а) не соответствует более сложному, но и более плавному, графику нагружения фундамента при строительстве сооружений и передаче полезной нагрузки;

б) не позволяет при испытании сваи заметить момент, когда в работу вступает пята буровой сваи.

Целью настоящей статьи является анализ данных полевых испытаний буроинъекционных свай под статической нагрузкой для выявления особенности сопротивления как процесса передачи нагрузки на грунт и обоснование их лабораторного моделирования.

1 Полевые испытания буроинъекционных свай

Рассмотрены данные производственных испытаний статической нагрузкой 71-ой сваи на 34-х объектах, проведенных предприятием ООО «ГТС» на объектах Краснодарского края. Испытуемые сваи имели диаметр D 250 и 350 мм, длину L от 7,5 до 20,8 м ($L/D = 30-60$).

При обработке результатов испытаний вычислялись «скорость» $V = \Delta s / \Delta P$, мм/Н, и «ускорение» $W = \Delta V / \Delta P$, мм/Н², свай по формулам, где вдавливающая сила P была принята в качестве независимой величины, а осадка сваи s – ее функции. Анализу подверглись изменения этих величин в ходе опыта.

Установлено [5], что графики испытаний буроинъекционных свай статической нагрузкой имеют характерную точку (обозначенную буквой M), в которой наблюдается локальный максимум «ускорения» осадки. «Скорость» V_M , «ускорение» W_M сваи и вдавливающая сила P_M в этой точке тесно связаны между собой. Связь между величинами V_M / P_M и W_M оценивается значением коэффициента корреляции 0,911.

Значения «ускорения» проходят через максимум W_M , который наступает задолго до исчерпания несущей способности сваи Φ_n , т. е.

$$P_M < \Phi_n, (2)$$

где P_M - значение вдавливающей силы при W_M ; Φ_n - несущая способность сваи.

Предположительно, максимум «ускорения» наступает в момент, когда исчерпывается несущая способность боковой поверхности, и свая резко ускоряется, а затем тормозится увеличивающимся сопротивлением под пятой.

Будем считать, что на 1-м этапе, при $P < P_M$, сопротивление буринъекционной сваи обеспечивается, в основном, за счет грунта вокруг боковой поверхности, а на 2-м этапе, при $P_M < P < \Phi_n$, - в большей степени, за счет грунта под пятой.

Для проверки устойчивости этого эффекта - появления точки M , в которой «ускорение» осадки имеет локальный максимум, - было проведено лабораторное моделирование работы буринъекционной сваи под нагрузкой.

2 Лабораторное испытание модели сваи

Уменьшенная модель буровой сваи испытывалась в разъемных стальных лотках. Для моделирования использовался пылеватый суглинок, раздробленный до максимального размера агрегатов 5 мм. Грунт укладывался в лоток с уплотнением до плотности $r = 1,52-1,57$ г/см³. Влажность грунта $W = 17-19$ %.

Модель сваи изготавливалась в уложенном и уплотненном грунте. Сначала создавалась скважина с выемкой грунта пробоотборником на всю глубину 125 мм. В скважину опускался арматурный каркас, выполненный из проволоки, закрепленной на распорках. Арматурный каркас выступал над поверхностью грунта на 20-30 мм. На выступающую часть надевался наголовник. Ствол сваи и наголовник заливался цементным раствором, который выдерживался до схватывания не менее 10 суток.

Испытание проводилось на лабораторной установке, переоборудованной с использованием нагрузочно-измерительного комплекса прибора АКП-6НМ конструкции В.В. Денисенко. Комплекс включает рычаг, по которому с заданной скоростью перемещается груз постоянной массы, создавая переменный момент силы тяжести относительно точки закрепления рычага. Этот момент уравнивался рычагом с постоянным плечом, на которое действует переменная реакция модели сваи. Таким образом, свая нагружалась вдавливающей силой P_m с постоянной скоростью её увеличения:

$$P_m = Bt_m, \quad (1)$$

где B - скорость увеличения силы, Н/с; t_m - время с начала нагружения, с. (Подстрочный индекс m относится к модели сваи.)

В ходе опыта синхронно регистрировались вдавливающая сила и осадка сваи. Шаг регистрации был принят размером 0,005 мм осадки сваи. Нагружение и регистрация выполняются в автоматическом режиме по заданной программе, включающей наибольшее значение вдавливающей силы, время её достижения, вид последующей операции, шаг регистрации осадки.

Произведены три опыта: один в лотке диаметром 128 мм и высотой 260 мм («Модель сваи-1») и два в лотке диаметром 258 мм и высотой 460 мм («Модель сваи-2» и «Модель сваи-3»). Размеры модели сваи и технология ее изготовления были одинаковыми во всех случаях. Первый опыт позволил отработать методику опыта. В опыте «Модель сваи-1» выяснилось, что размеры лотка малы, и корпус лотка влияет на результаты испытаний: напряжения, создаваемые моделью сваи, приподнимают ее, и осадка сваи чередуется с поднятием, хотя в целом, осадка увеличивается с увеличением вдавливающей силы.

Второй опыт «Модель сваи-2» позволил выявить ошибки, связанные

с балансировкой рычага. Кроме того, малая влажность грунта стала причиной малой осадки модели сваи, что сделало картину перемещений модели мало выразительной. Наиболее удачным оказался опыт с «Моделью сваи-3».

Все три опыта показали присутствие эффекта локального максимума «ускорения» осадки. По окончании опытов керн грунта освобождался от разъемного лотка и разрушался нажатием на модель сваи. На вертикальном сколе керна видно, что область уплотненного грунта вокруг сваи действительно расширяется книзу, но имеет более сложную форму, чем усеченного конуса: ее горизонтальное сечение вытянуто вдоль диаметра, через который прошёл скел.

Под пятой свай уплотнение грунта наибольшее, такое, что грунт прилипает к нижнему концу сваи, образуя малый конус, обращенный вершиной вниз.

3 Числовые результаты испытаний моделей

Испытание «Модели сваи-3» проводилось в разъемном лотке РЛ-258 диаметром 258 мм и высотой 460 мм. Использовано нагружение с постоянной скоростью увеличения вдавливающей силы 0,0249 Н/с. Нагружение и регистрация осадки производились автоматически с шагом осадки 0,005 мм, что позволило построить график зависимости $s(P)$ по 728-ми точкам (Рисунок 1).

Осадки модели сваи увеличивается, в целом, с увеличением вдавливающей силы, но «скорость» осадки, вычисленная на интервале 50 Н, изменяется в обе стороны: на коротком интервале приращения силы увеличение сменяется уменьшением. В целом, «скорость» осадки увеличивается с увеличением вдавливающей силы (Рисунок 2).

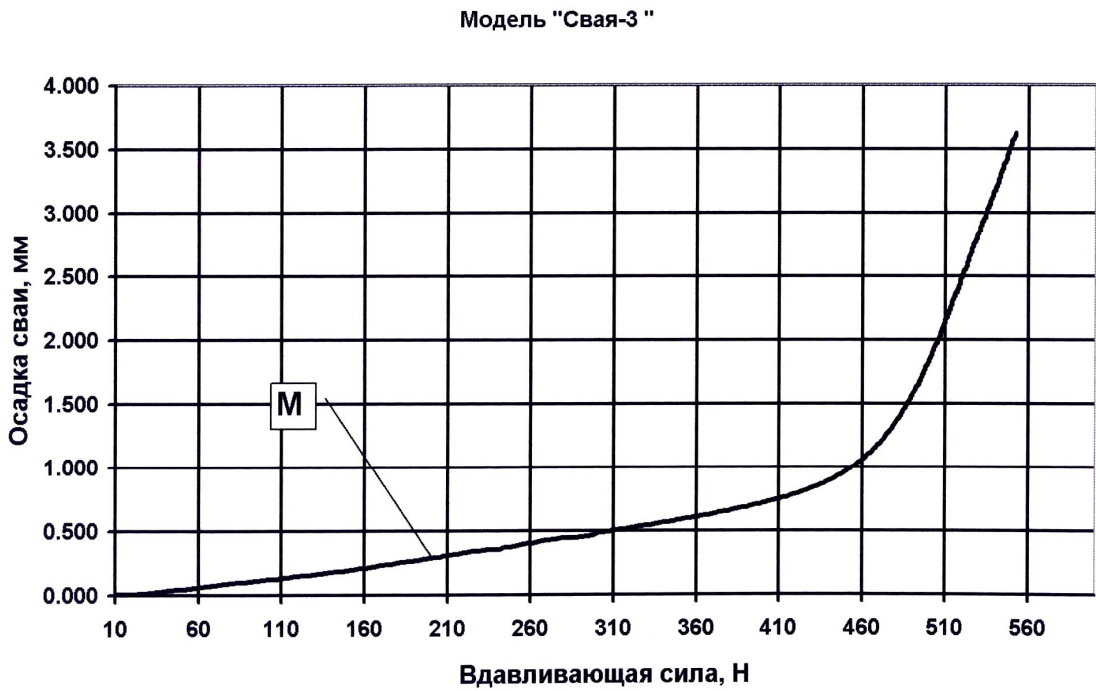


Рисунок 1 – График увеличения осадки модели сваи при увеличении вдавливающей силы

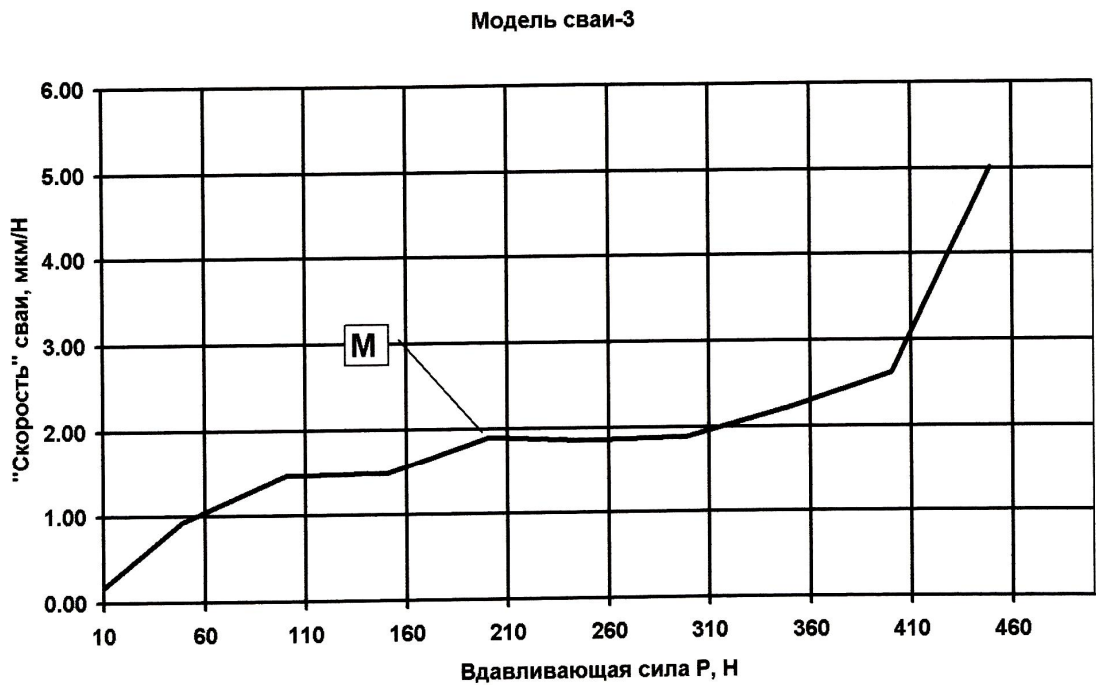


Рисунок 2 – Изменение «скорости» осадки модели сваи-3

«Ускорение» осадки также испытывает колебания и даже меняет знак на противоположный, и амплитуда этих колебаний резко увеличивается при приближении вдавливающей силы к значению несущей способности (Рисунок 3).

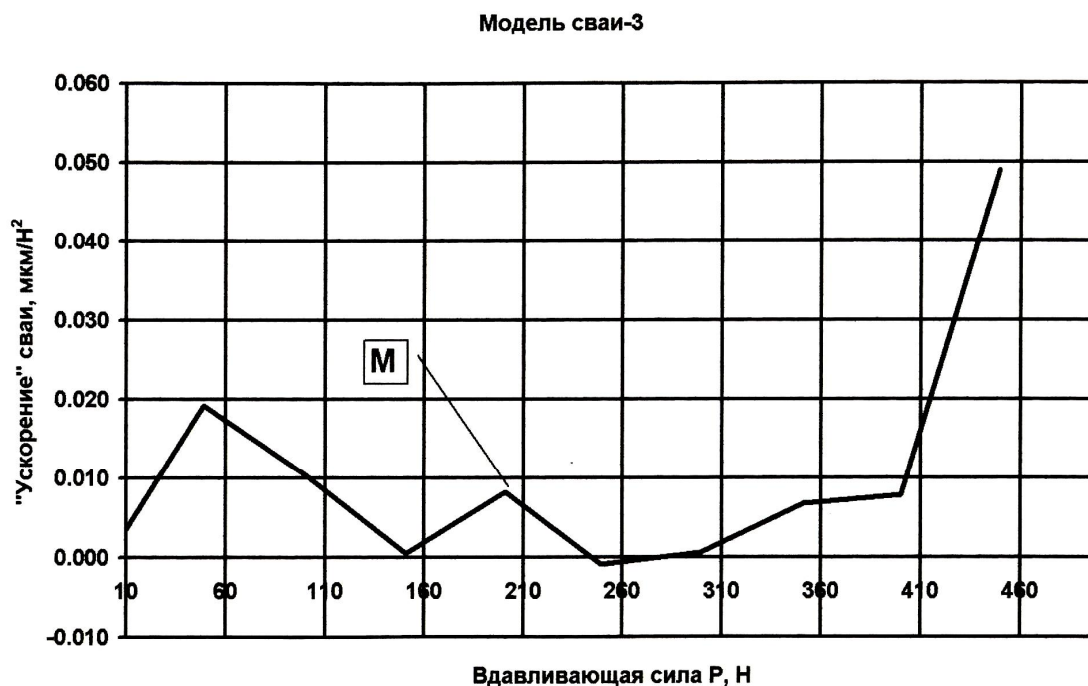


Рисунок 3 – Изменение «ускорения» модели сваи-3. Локальный максимум в точке М рассматривается как характерный для буронабивных свай. Первый локальный максимум на рисунке является следствием технологического люфта

График «ускорения» проходит через локальный максимум на участке испытаний, где выбраны технологические люфты, и сопротивление сваи зависит только от взаимодействия с грунтом, как это наблюдалось в полевых испытаниях. Этот эффект проявился во всех трех лабораторных опытах (Рисунки 3, 4 и 5), что подтверждает его достоверность его проявления в натуральных сваях. Эффект максимума «ускорения» осадки позволяет взглянуть на сопротивление сваи как на процесс, состоящий, по крайней

мере, из двух этапов (см. п. 1), качественно различных, каждый из которых может быть охарактеризован численно.

Попытка охарактеризовать численно 2-ой этап процесса сопротивления сваи описана ниже.

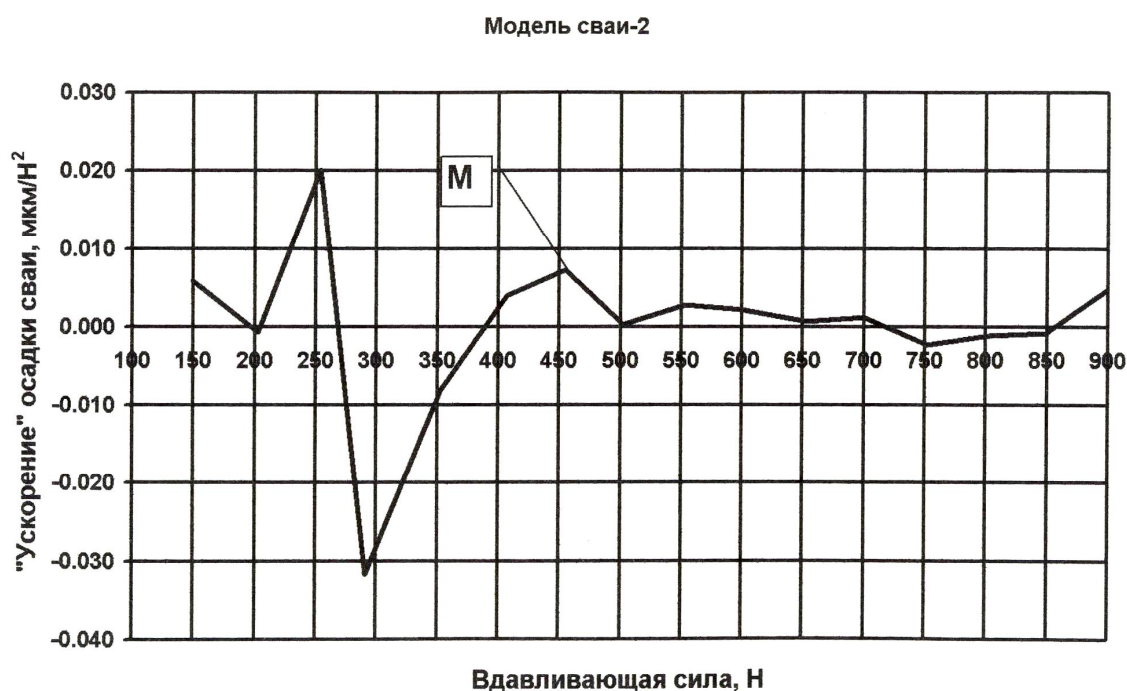


Рисунок 4 - Изменение «ускорения» модели сваи-2. Локальный максимум в точке М рассматривается как характерный для буроинъекционных свай. Первый локальный максимум на рисунке является следствием технологического люфта

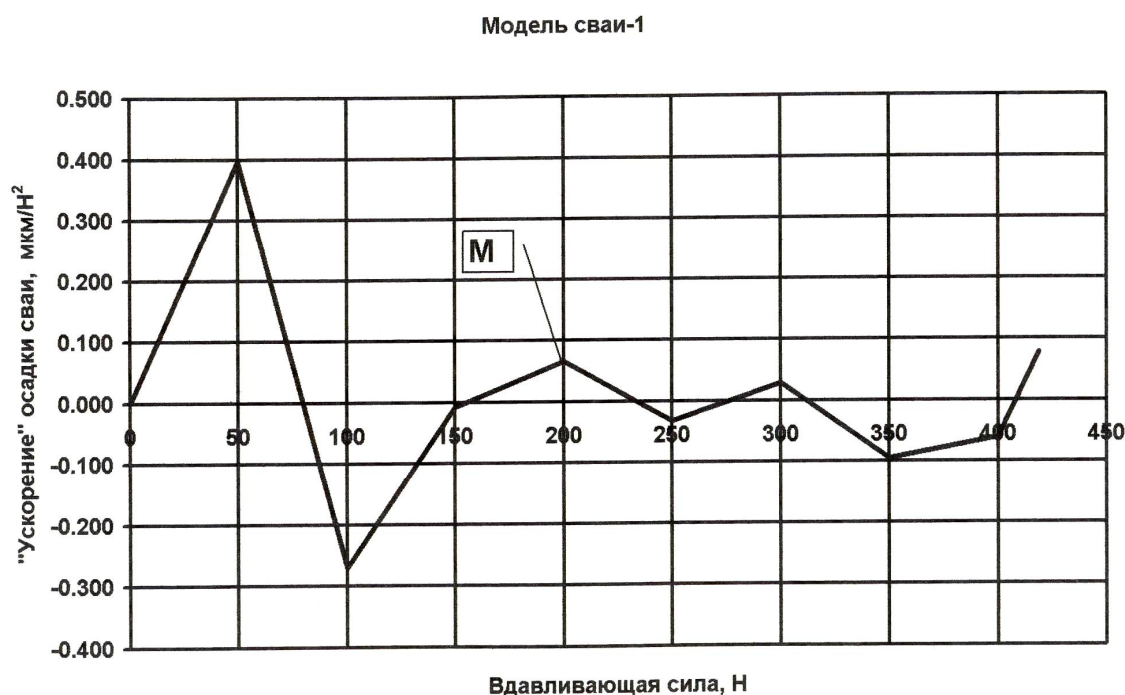


Рисунок 5 - Изменение «ускорения» модели сваи-1. Локальный максимум в точке М рассматривается как характерный для буроинъекционных свай. Первый локальный максимум на рисунке является следствием технологического люфта

4 Обоснование лабораторной модели

Моделирование работы сваи под нагрузкой было основано на положениях теории подобия. Потеря несущей способности буровой сваи происходит вследствие наступления предельного состояния грунта в основании сваи – под пятой. В этом месте образуется зона предельного равновесия грунта. Схематически она была представлены Б.В. Бахолдиным (1985), с использованием работ Л.С. Лapidуса и Ф.К. Лапшина (1972), в виде области цилиндрической формы.

При сделанных предположениях, сила сопротивления сваи на 2-м этапе (см. п. 1) - этапе преимущественной работы грунта под пятой - определяется ускорением уплотненного грунта под пятой. Согласно второго закона Ньютона,

$$\Phi_n = QA, \quad (2)$$

где Q - масса области уплотненного грунта под пятой, A - ускорение этой области на 2-м этапе. (Подстрочный индекс n будет относиться к натуральной свае, m - к модели сваи.)

Выразим несущую способность модели сваи формулой

$$\Phi_m = qa, \quad (3)$$

где q - масса области уплотненного грунта под пятой модели, a - ускорение этой области на 2-м этапе.

Для 2-го этапа испытаний напишем коэффициент подобия несущей способности натуральной сваи и модели:

$$a_\Phi = \frac{\Phi_n}{\Phi_m}, \quad (4)$$

или, с учётом (2) и (3),

$$a_\Phi = \frac{QA}{qa} = a_q a_a, \quad (5)$$

где $a_q = \frac{Q}{q}, \quad (6)$

$$a_a = \frac{A}{a}. \quad (7)$$

Коэффициент подобия a_Φ позволяет вычислить несущую способность натуральной сваи по результатам испытания модели.

5 Расчёт коэффициентов подобия

Расчёт коэффициентов подобия модели и натуральной сваи осложняется двумя обстоятельствами:

1) недостатком данных о форме и размерах области уплотненного грунта под пятой сваи;

2) различием в технологии нагружения натуральной сваи (ступенями нагрузки) и модели (возрастающей с постоянной скоростью силой).

5.1 Объем области предельного равновесия

При определении объема области предельного равновесия G_n по схеме Б.В. Бахолдина (1985) используются диаметр ствола D_n и длина сваи L_n , при определении массы – плотность грунта r_n . Линейные размеры модели сваи в несколько раз меньше натуральной сваи. Плотность грунта в лотке меньше плотности грунта природного сложения. Введем коэффициенты подобия, как отношения значений этих величин:

$$a_D = \frac{D_n}{D_m}, a_L = \frac{L_n}{L_m}, a_r = \frac{r_n}{r_m}. \quad (8)$$

В действительности, при изучении области G_m модели нами выявлено, что область предельного состояния имеет форму не цилиндра, а более сложную: ее размеры изменяются вдоль вертикальной оси сваи, а горизонтальное сечение вытянуто вдоль диаметра сваи на его продолжении за пределы ствола. Поэтому объем области предельного состояния зависит ещё и от отношения размеров в разных направлениях. Учтем это наблюдение введением дополнительного коэффициента подобия

$$a_{L/D} = \frac{L_n / D_n}{L_m / D_m}. \quad (9)$$

Используя отношения (8) и (9), перепишем (6) в виде

$$a_q = a_L a_D^2 a_{L/D} a_r. \quad (10)$$

Формула (10) может быть подставлена в формулу (5) для определения условий моделирования.

5.2 Учёт различий в технологии испытаний

Натуральные сваи испытывались путем ступенчатого приложения вдавливающей силы, причем довольно крупными ступенями: 25-200 кН.

Обозначим скорость перемещения буроинъекционной сваи на ступени нагружения, следующей за точкой максимума M , через V_n , а скорость перемещения модели сваи через V_m ; их отношение обозначим как

$$a_v = \frac{V_n}{V_m}, \quad (11)$$

Отношение соответствующих интервалов времени, принятых для вычисления значений, обозначим как

$$a_t = \frac{t_n}{t_m}. \quad (12)$$

Значения скорости перемещения натуральной сваи вычисляем по формуле, используя данные производственных испытаний [5]:

$$V_n = \frac{\Delta s_{n.st} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3600},$$

где $\Delta s_{n.st}$ – приращение осадки, мм, на участке стабилизации на ступени нагрузки, следующей за точкой M на Рисунке 3.

$V_m = 2,25 \cdot 10^{-6} \text{ м/Н}$ - «скорость» перемещения модели сваи на участке испытания после точки M , где значения V_m стабилизируются примерно на одном уровне при дальнейшем возрастании вдавливающей силы (Рисунок 2). $B = 0,0249 \text{ Н/с}$ - скорость нагружения модели сваи (задана оператором). Тогда действительная скорость перемещения сваи $V_m = 2,25 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0249 \text{ м/с}$.

Интервалы времени примем по данным испытаний. Для натуральной сваи по формуле

$$t_n = \frac{\Delta s_n \cdot 6 \cdot 3600 \cdot 200}{\Delta P_n s_n^{0,01}} ;$$

где Δs_n – приращение осадки на ступени нагрузки, следующей за точкой M ; s_n - полная осадка сваи на этой ступени; 0,01 – эмпирический безразмерный коэффициент; ΔP_n - размер ступени нагружения; 200 кН – наибольшее примененное значение ступени нагружения.

Для модели сваи – из графика скорости осадки (Рисунок 2) и формулы (1) получаем:

$$t_m = 115c .$$

Теперь (7) можно переписать в виде:

$$a_a = \frac{a_v}{a_t} , (13)$$

а формулу (5) – в виде

$$a_\Phi = a_L a_D^2 a_{L/D} a_r \frac{a_v}{a_t} . (14)$$

Из отношения (4) получаем формулу для расчёта несущей способности натуральной сваи

$$\Phi_n = a_\Phi \Phi_m . (15)$$

6 Прогноз несущей способности буринъекционных свай

Расчёты несущей способности натуральных свай разной длины, по данным моделирования и по формуле (15), для фиксированных значений диаметров приведены на Рисунке 6 в виде номограммы. Как видно, прогнозируемая несущая способность возрастает нелинейно с увеличением длины сваи и зависит от диаметра сваи.

Интересно сравнение расчётных значений несущей способности со значениями, определёнными полевыми испытаниями статической нагруз-

кой [5]. При этом сравнении были учтены доступные параметры каждой испытанной сваи: диаметр D_n , длина L_n , плотность грунта γ_n , размер ступени нагружения ΔP_n , Δs_n – приращение осадки на ступени нагрузки, следующей за точкой M ; длительность наблюдения за осадкой на ступени Δt_n . Последний параметр учтен приблизительно из-за отсутствия достоверных данных.

Сравнение данных для массива из 64-х показало корреляцию расчётных и фактических значений с коэффициентом 0,692, довольно высоким для данных полевых испытаний, изначально не предназначенных для исследований. При этом среднее квадратичное отклонение разности расчётных и фактических значений имеет огромное значение – 560 кН.

Удовлетворительная корреляция расчётных и фактических значений указывает на принципиальную применимость лабораторного моделирования буроинъекционных свай. С другой стороны, большой разброс значений свидетельствует о недостаточном учёте при моделировании индивидуальных особенностей натуральных свай и грунтов, в которых они были выполнены.

Выводы

1. При полевых испытаниях буроинъекционных свай статической нагрузкой наблюдается локальный максимум «ускорения» осадки. Лабораторные испытания моделей свай подтверждают существование этого эффекта.

2. Эффект локального максимума «ускорения» осадки объясняется, предположительно, тем, что на 1-ом этапе испытания, до точки максимума, сопротивление буроинъекционной сваи обеспечивается, в основном, за счет грунта вокруг боковой поверхности, а на 2-м этапе, после точки максимума, в большей степени, - за счет грунта под пятой.

3. На основе этого предположения (см. п.2 Выводов) построена методика лабораторного моделирования статической работы буроинъекционной сваи, как **процесса сопротивления** сваи вдавливающей силе. Результаты моделирования соотносятся с результатами полевых испытаний натуральных свай статическими нагрузками с коэффициентом корреляции 0,692.

4. Испытание моделей свай вдавливающей силой с постоянной скоростью её увеличения с малым шагом регистрации осадки выявили неравномерное изменение скорости и ускорения осадки.

Список литературы:

1. Готман А.Л. Свайные фундаменты. (Обзорно-аналитическая лекция)//Российская геотехника – шаг в XXI век. Юбилейная конф., посвящ. 50-тилетию РОМГГиФ, Москва, 15-16 марта 2007 г., 2007, 16 с.

2. Совершенствование методов определения несущей способности свай/Трофименков Ю.Г., Бахолдин Б.В., Швец В.Б., Мариупольский Л.Г., Работников А.И., Алексеев А.И., Любов О.И. – В кн.: Труды к VIII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. М., Стройиздат, 1973, с. 150-161.

3. Григорян А.А., Иванов Е.С. Несущая способность и способ устройства свай в лессовых грунтах. - В кн.: Труды к VIII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. М., Стройиздат, 1973, с. 140-150.

4. Григорян А.А. Расчет оснований свайных фундаментов в свете решения задач механики грунтов// Труды Международной научно-практической конф. по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. Т.1, Пермь, 2004, с. 200-205.

5. Ляшенко П.А., Обухов И.М. Анализ результатов статических испытаний буроинъекционных свай, выполненных в различных грунтовых условиях Краснодарского края//Труды КубГАУ, № 6(21), 2009, с. 153-156.

6. Моделирование проявлений горного давления/Кузнецов Г.Н., Будько М.Р., Васильев Ю.И., Шклярский М.Ф., Юревич Г.Г. – Ленинград: Недра, 1968.