

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 2. С. 207–222.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (2): 207–222.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21:624.154.5:624.131.38

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-207-222

К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ШТАМПОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТА В ОСНОВАНИИ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОПОР МОСТОВ

**Владимир Михайлович Картопольцев¹,
Андрей Владимирович Картопольцев¹,
Александр Аверьянович Алексеев²**

¹ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

Аннотация. Объектом исследования является строительство мостовых сооружений, возводимых на грунтовом основании с физико-механическими характеристиками, нередко отличающимися от параметров изыскательских мероприятий. Нормативно-техническим регламентом строительства фундаментов опор мостов предусматриваются мероприятия с использованием штамповых испытаний по грунту.

Авторы акцентируют внимание на повышении качества не только подготовительных работ, но и самого процесса штамповых испытаний, отвечающих требованиям надежности сооружения зависимостью $S = f(p)$, аппроксимированной кривой Риттера – Рассохина при различном поведении грунта основания под подошвой штампа в обычных условиях и с учетом сдвига (выпора), что позволяет рассчитать предельную осадку и другие расчетные характеристики грунта.

Полученные результаты контроля качества штамповых испытаний с учетом проявления касательных напряжений в слоях грунтового основания под штампом позволили внести уточнения в регламент работ на проведение штамповых испытаний.

Ключевые слова: штамп, надежность, нагрузки, испытания, прочность, долговечность, буронабивные сваи

Для цитирования: Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Алексеев А.А. К вопросу совершенствования штамповых испытаний грунта в основании буронабивных свай при строительстве опор мостов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 2. С. 207–222. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-207-222.

ORIGINAL ARTICLE

IMPROVEMENT OF SOIL PLATE-BEARING TEST OF DRILLED PILE FOOT DURING BRIDGE SUPPORT CONSTRUCTION**Vladimir M. Kartopoltsev¹, Audrey V. Kartopoltsev¹, Aleksandr A. Alekseev²**¹ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Purpose: The aim of this work is the construction of bridge structures on a soil foundation with physical and mechanical characteristics, often differing from survey activity parameters. Technical regulations of bridge supports envisage plate-bearing test of drilled pile foot.

Design/methodology/approach: The quality improvement of not only plate-bearing test preparation, but also requirements for structural reliability, the approximated Ritter-Rassokhin method with different soil behavior under normal conditions with regard to foundation uplift, which allows calculating the maximum draft and other design parameters of soil.

Practical implications: The obtained results make it possible to clarify the work regulations for plate-bearing test.

Keywords: plate-bearing test, reliability, load, strength, durability, bored piles

For citation: Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Alekseev A.A. Improvement of soil plate-bearing test of drilled pile foot during bridge support construction. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (2): 207–222. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-207-222.

В современных условиях строительства опор мостов существуют требования к рабочей документации, которые необходимо выполнять в процессе технологических работ по сооружению свайных фундаментов опор из буронабивных свай¹ [1, 2, 3]. Требования направлены на обеспечение качества устройства фундаментов опор, надежности и выполнения требований расчета с гарантией при этом заявленного в проекте коэффициента запаса [4]. Оптимальный уровень надежности опор моста определяется исходя из условия минимума среднеожидаемых затрат на возведение опор и эксплуатации моста в целом. Надежность конструкций фундамента опор определяется способностью сохранять качество фундаментов и опор в процессе эксплуатации².

Это обстоятельство, прежде всего, связано с учетом касательных напряжений, возникающих в слоях грунтового основания под подошвой наконечника штампа (рис. 1).

Прикладывая нагрузку q в пределах штампа радиусом a с центром в точке O в виде элементарного груза $P = q \cdot p \cdot d\phi \cdot dp$ с последующим инте-

¹ ГОСТ 20276–2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформативности. Москва: Стандартинформ. 86 с.

² Методические рекомендации по проектированию опор и мостов. Всесоюзное научно-техническое общество железнодорожников и транспортных строителей. Ленинград, 1988. 63 с.

гированием по углу φ в пределах от 0 до 2π , а затем по P в пределах от 0 до a , получим равнодействующую упругую силу R в виде

$$R = (p^2 + b^2 - 2b \cdot p \cos \varphi)^{1/2}. \quad (1)$$

Тогда
$$\sigma_x = \frac{3a^3q}{2\pi} \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{P dp d\varphi}{(p^2 + b^2 - 2b \cdot p \cos \varphi)^{5/2}}. \quad (2)$$

При $b = 0$
$$\sigma_x = \sigma_r = \frac{1-2\mu}{2} q. \quad (3)$$

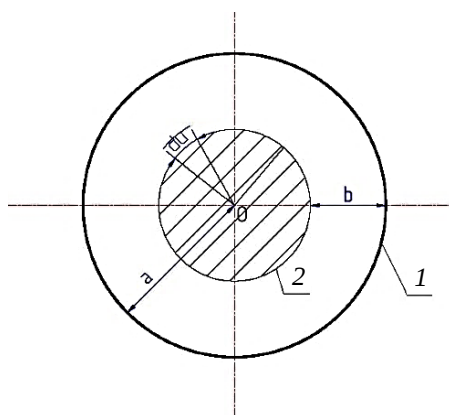


Рис. 1. Схема приложения нагрузки от штампа:

1 – обсадная труба; 2 – штамп

Fig. 1. Schematic of plate-bearing test:

1 – stand pipe; 2 – plate bearing

Вертикальные перемещения (Δ_s) грунтового основания под штампом будут равны:

$$\Delta_s = \frac{2(1-\mu^2)}{E} a \cdot q. \quad (4)$$

При штамповых испытаниях несущая способность фундамента и деформативность основания оцениваются одним показателем – осадкой под подошвой наконечника штампа. Принимая среднеожидаемые значения нагрузки и осадки грунта при $t = t_0$; $t = t_1$; $t = t_2 \dots t_n$ как функционал монотонно убывающей по параболе гауссовской зависимости «нагрузка – деформация», корреляция замеренных при испытании значений укладывается в интервале в зависимости от вида напряженно-деформированного состояния грунта под подошвой штампа [5] (рис. 2).

Такая форма зависимости $S = f(p)$, как правило, объясняется программой испытаний и требуемыми условиями подготовки грунтового основания под наконечником штампа, отвечающими задаче соответствия проектной и реальной несущей способности свайного поля ростверка фундамента опор моста.

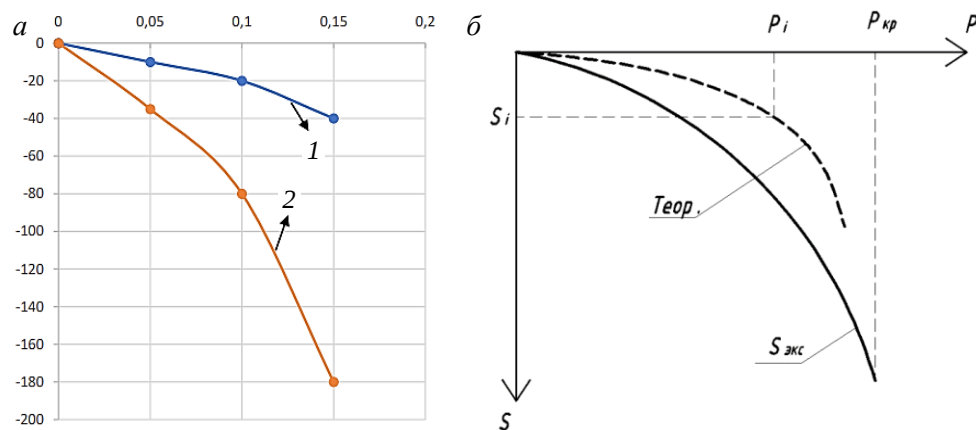


Рис. 2. График зависимости $S = f(p)$ испытания грунта штампом:
 a – грунт: 1 – уплотненный; 2 – неуплотненный; b – начало развития пластических деформаций при длительном нагружении

Fig. 2. Dependence $S = f(p)$ of plate-bearing test:
 a – soil: 1 – compacted; 2 – non-compacted; b – plastic deformation initiation under prolonged loading

Расположение экспериментальных значений ряда штамповых испытаний на графике $S = f(p)$ дает основания считать, что в пределах реального интервала значений осадки и нагрузки закономерности подчиняются некоторому единому закону деформирования в виде квазипараболического очертания (рис. 2). Это обстоятельство позволяет считать, что использование метода штамповых испытаний грунта для определения закономерности и конечных результатов допустимо и может рассматриваться в виде математической аппроксимации зависимости Риттера (1879 г.) – Рассохина (1974 г.) в виде

$$P_i = P_{кр} \left(1 - e^{-M \cdot S_i} \right), \quad (5)$$

где e – основание натурального логарифма; $M = \frac{1}{S_i} \ln \frac{P_{кр}}{P_{кр} - P_i}$ – параметр экспоненты; $P_i < P_{кр}$; $P_{кр}$ – критическое давление на грунт под штампом.

Задача программы проведения штамповых испытаний грунта в основании буронабивных свай свайного поля ростверка фундамента опор является подтверждением подобия проектных значений и реального состояния для одной буронабивной сваи с последующим распространением результатов испытаний на весь ростверк фундаментов в рамках так называемого «эталонного объекта или элемента» [6]. Необходимость и целесообразность проведения штамповых испытаний нередко связаны с имеющими место корректировками в процессе строительства, условиями и конструктивными изменениями опор моста. Имеющие место реальные вариации изменения условий грунта под основанием буронабивных свай, отличных от проектных и изыскательских мероприятий, определяют штамповые испытания в грунте под подошвой штампа. Эталон штамповых испытаний по регламенту отечественных требований

основан на 10 этапах загрузки сваи от 2 до n этапов нагружения при качественной подготовке основания под наконечником штампа [6, 7].

При экспериментальных исследованиях с проведением штамповых испытаний при строительстве опор автодорожных мостов грунтовые условия, нагружающие устройства штамповых испытаний, которые представлены на (рис. 3, рис. 4, *а* и *б*), позволили оценить предельные значения средней осадки (ΔS_{cp}) и сопротивления грунта под подошвой штампа в соответствии с ГОСТ 20276.1–2020³ [8, 9]. Качество штамповых испытаний зависит от подготовительных работ, особое место среди которых отведено подготовке нагружающего устройства и основания под штампом. Некачественная подготовка грунтового основания под штампом часто приводит к искажениям при определении состояния предельного равновесия в грунте при графическом изображении зависимости $S = f(p)$ (см. рис. 2, *а*). Таким образом, в начальной стадии деформирования в процессе нагружения происходит обжатие непосредственно под штампом грунтового основания с возможными искажениями значения деформирования грунта во всех других этапах испытания и в конечном итоге в стадии предельного давления. Такое положение рассматривается как несанкционированное отступление от программы и расчетов штамповых испытаний, приводит к неоправданному увеличению режимов испытания и затруднениям принятия соответствующих решений.



Рис. 3. Грунты инженерно-геологических изысканий
Fig. 3. Geotechnical survey soils

³ ГОСТ 20276.1–2020. Грунты. Методы испытания штампом. Москва. Стандартинформиздат, 2020. 14 с.

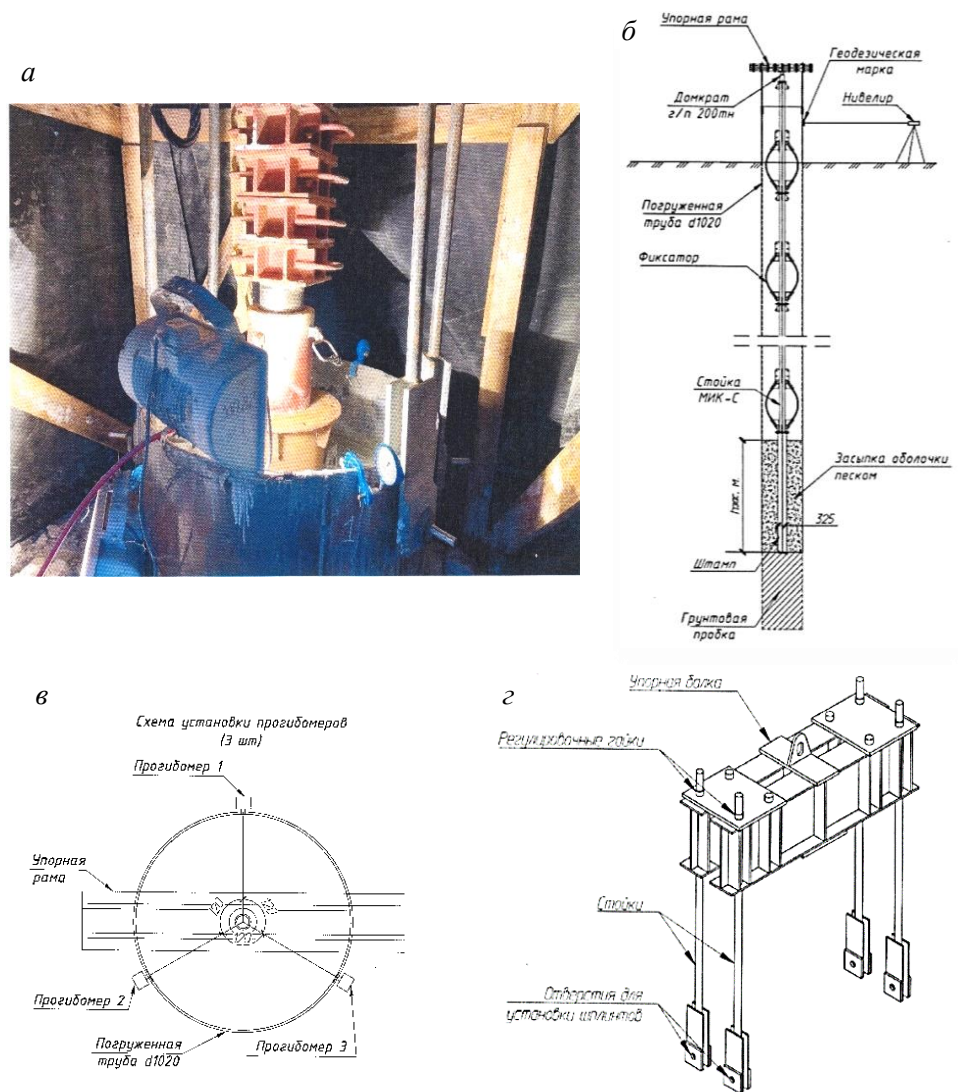


Рис. 4. Схема устройства штамповых испытаний:

а – общий вид нагрузочного устройства; б – принципиальная схема установки для штамповых испытаний; в – схема установки прогибомеров; г – общий вид упорной балки нагрузочного устройства

Fig. 4. Schematic of plate-bearing test device:

а – general view of loading device; б – plate-bearing test device; в – deflectometer; г – general view loading device thrust beam

При наличии в составе испытаний упругой и пластической стадии работы обжатия грунтового основания под штампом, любое неоправданное и не подтверждённое расчётом решение рассматривается в данной точке грунта основания под штампом как случайный процесс, определяемый спектром мощности, т. е. спектральной функцией процесса ускорения при деформировании. Этот этап рассматривается спектром упругой реакции грунта, который заложен в програм-

ме испытаний и нормативном подходе при планировании этапов штамповых испытаний. Согласованность этапов нагружения считается достигнутой, если значение реакции для всех точек грунта под подошвой штампа, находящегося в условиях воздействия случайного процесса, определенного спектром мощности, совпадает на $\pm 10\%$ с расчетным спектром упругой реакции.

Отсутствие данных требований приводит к тому, что начало диаграммы $S - f(p)$ отмечается не с нуля, а с какой-то другой величины (рис. 5, а, б). В связи с этим формирование уплотненного грунтового ядра под подошвой штампа изменяет диаграмму напряженно-деформированного состояния, в т. ч. и предельного, с учетом сдвига для других слоев грунта под штампом [10]. Для установления реального напряженно-деформированного состояния грунта в процессе нагружения под штампом рассматривается три стадии уплотнения:

1. Модель В.Г. Березанцева, в которой ядро уплотнения представляется в виде прямоугольного треугольника, а кривая скольжения исходит из вершины уплотненного ядра (рис. 6).

2. Модель Терцаги – образование уплотненного ядра в грунте в виде треугольника с углами при основании, равными углу внутреннего трения ϕ грунта слоя под штампом. Кривые скольжения или в предельном состоянии выпор грунта исходят из вершины ядра и направлены вертикально вниз: например, для слоев грунта 3, 4, 5 (см. рис. 3) $y_0 = 0,5b \tan \phi$; $\phi = 30^\circ$; $b = 4$ м; $y_0 = 1,155$ м. При давлении на штамп $g = 26,29$ т/м²; $y_0 = 1,155$ м; $g = 27,52$ т/м²; $y_0 = 1,455$ м.

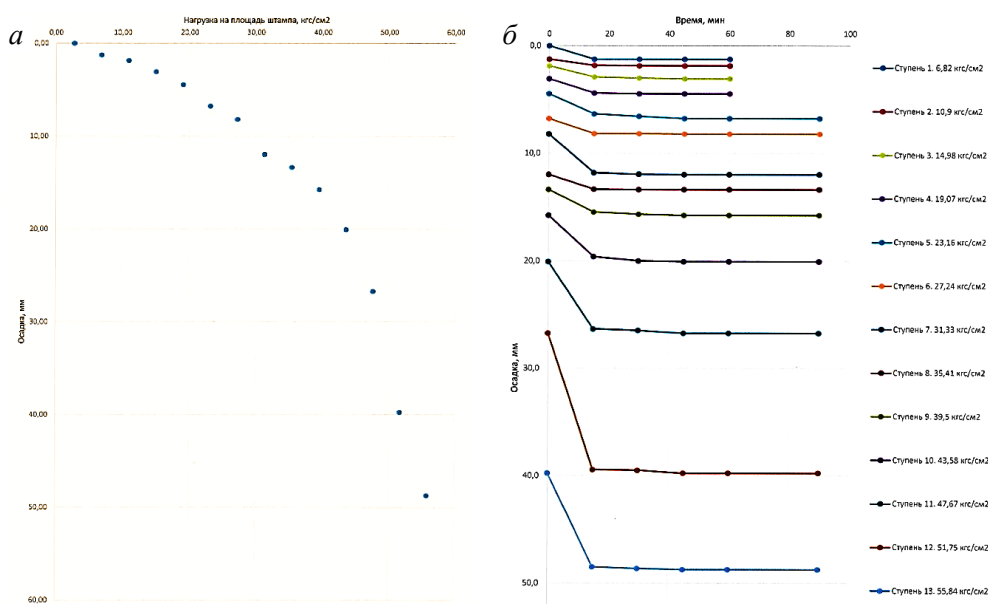


Рис. 5. Зависимость осадки от нагрузки (а); зависимость осадки от времени (б)

Fig. 5. Settlement-load dependence (a); settlement-time dependence (b)

Предельная осадка грунта под штампом с учетом отмеченных обстоятельств должна быть равна:

$$\Delta_s = \frac{0,22 N_g}{G_2 \cdot \varnothing} + \frac{N_g \cdot l}{E \cdot A}, \quad (6)$$

где G_2 – модуль сдвига; $\varnothing$ – диаметр штампа; N_g – давление на штамп; A – площадь штампа; l – отметка нахождения штампа.

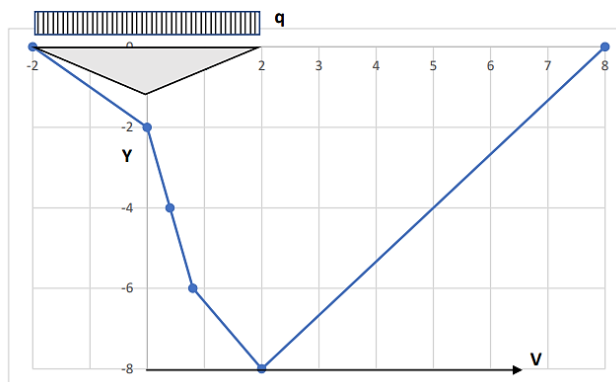


Рис. 6. Схема уплотнения грунта под штампом
Fig. 6. Diagram of soil compaction under plate bearing

Влияние учета неоднородности и деформативности слоев грунта в основании под штампом направлено на оценку анизотропии грунта в основании, которое не всегда фиксируется изыскательскими мероприятиями и проявляется в реальных условиях при строительстве изменением значения и формы осадки слоев грунта. В этих условиях, используя исследования К. Вольфа, необходимо принять следующие решения в определении модуля сдвига (G) грунтов оснований:

$$G = \frac{E_x \cdot E_z}{E_x + E_z (1 + 2\mu)} \approx 0,4E_i, \quad (7)$$

где $\mu = \mu_x + \mu_z$ – коэффициент Пуассона; $E_x = E_z = \omega(1 - \mu_i^2)b \frac{P_i}{S_i}$ – модуль де-

формации; P_i , Δ_{Si} – нагрузка (кг) и осадка штампа (см), соответствующие условному пределу пропорциональности между ними; $b = \varnothing$ – сторона квадратного или диаметра круглого штампа; ω – безразмерный коэффициент, равный для квадратного штампа 0,88 и для круглого 0,79 [11].

Предельное давление на грунт под подошвой штампа соответствует предельному равновесию. Это значит, что осадка грунта под штампом (Δ_s) меньше предельно допускаемой и равна 0,1–0,12 мм за этап нагружения. Такое состояние характеризуется стабилизацией деформирования и указывает на окончательную стадию уплотнения грунта в упругой стадии и переход в фазу сдвиговых явлений, характеризующиеся пластическим деформированием. Теоретическая глубина распространения выпора грунта при пластической деформации (Z) по Р.П. Пузыревскому равна [12]:

$$Z = 0,25\varnothing. \quad (8)$$

Тогда предельное сопротивление грунта под штампом определится по формуле

$$P_{\text{пр}}^{\text{гр. шт}} = \frac{\gamma_{\text{г}} \cdot \varnothing}{2} N_{\gamma} + \left(N_{\text{домк}} + \frac{C}{\text{tg}\varphi} \right) N_g - C(\text{tg}\varphi), \quad (9)$$

где $\frac{C}{\text{tg}\varphi} = P_c$ – давление связности, равное 0,04–0,26 кг/см² (26 КПа); C – удельное сцепление грунта под штампом, тс/м²; $N_{\text{домк}}$ – давление в домкрате; φ – угол внутреннего трения; N_{γ} , N_g – коэффициенты несущей способности по грунту в зависимости от угла φ (табл. 1); $\gamma_{\text{г}}$ – средняя плотность грунта под штампом.

Таблица 1
Table 1

φ	16	20	24	30	36	40	44	46
N_{γ}	3,4	6,0	9,8	21,6	52,4	100	221	319
N_g	4,4	6,5	9,8	19,3	44,5	72	73,7	195

Расчетное давление, при котором происходит стабилизация с предельной деформацией осадки грунта 0,1 мм, являющейся границей перехода деформирования грунта под подошвой штампа из упругого в пластическое состояние, равно:

$$P_{\phi} = \frac{\pi \cdot \gamma_{\text{г}} \left(0,25\varnothing + h_3 + \frac{C}{\gamma_{\text{г}}} \text{tg}\varphi \right)}{\text{ctg}\varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi}, \quad (10)$$

где h_3 – предельная граница погружения штампа.

В нашем случае при $h_3 = 2600$ см, $\gamma_{\text{г}} = 1,92$ кг/см³, $\varnothing = 102$ см, $\varphi = 31^\circ$, $\text{tg}\varphi = 0,6$, $\text{ctg}\varphi = 1,66$, $C = 26$ кПа.

Предельное критическое давление ($P_{\text{кр}}$) на грунт под штампом, при котором обеспечивается его предельное сопротивление по несущей способности и деформативности, определяется по формуле

$$P_{\text{кр}} = \gamma_{\text{г}} \left[\frac{0,5\pi}{\text{ctg}\varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi} \varnothing + \left(\frac{\pi}{\text{ctg}\varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi} \right) h_3 + \frac{\pi}{\text{ctg}\varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi} \frac{C}{\text{tg}\varphi} \right]. \quad (11)$$

Для этой стадии окончательным является выполнения условия $P_{\text{кр}} < P_{\text{пр}}^{\text{гр. шт}}$, которое указывает на окончание испытаний и соответствует концевым участкам параболы на графике (см. рис. 5).

Таким образом, согласно расчетам испытания (рис. 5, 6), приходим к выводу, что на этапах 6 и 7 суммарная осадка равна расчетной и характеризует достижения предельного равновесия в грунте под штампом с переходом в пластическую стадию и выпирания, о чем свидетельствует факт отклонения графика от параболической функции изображения зависимости $S - P$ участка на рис. 5 [13].

В условиях адекватности штамповых испытаний грунтов на сжимаемость в полевых условиях (рис. 7) принимаем модуль деформации E_i постоянным в пределах каждого слоя в зависимости между $\varepsilon_i - f(\sigma_i)$. Для контроля достоверности штамповых испытаний используются известные способы:

1. Установить на кривой $S = f(P)$ нагрузку, при которой суммарная остаточная осадка грунта под штампом за 48 ч не превышает 750 мм, и разделить на коэффициент запаса 2.

2. Установить на кривой $S = f(P)$ нагрузку, при которой в течение последних 24 ч отсутствовали осадки грунта под штампом, а суммарная осадка, включая упругие деформации, составляет не более 0,25 мм на 1 тс давления в домкрате, и разделить эту нагрузку на коэффициент запаса 2.

3. Установить на кривой $S = f(P)$ точку перелома, соответствующую пластическому деформированию, и разделить эту нагрузку, соответствующую этой точке, на коэффициент запаса 1,5.

4. Провести касательную к линии кривой $S = f(P)$. Определить нагрузку в точке их пересечения и разделить на коэффициент запаса 1,5.

5. Найти на кривой $S = f(P)$ точку, в которой полная осадка грунта под штампом становится больше 0,1 мм на 1 тс добавленной нагрузки, и разделить на коэффициент запаса 1,5.

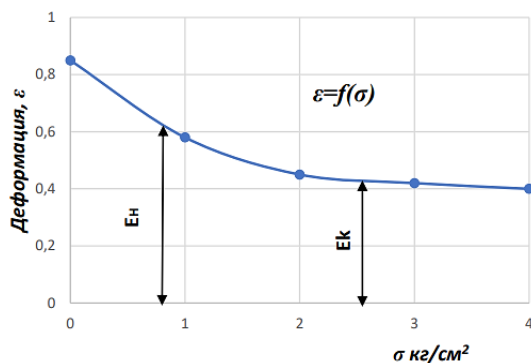


Рис. 7. Кривая сжимаемости грунта

Fig. 7. Soil compressibility curve

Предложения с 1-го по 5-й пункты прежде всего связаны с учетом касательных напряжений в слоях грунтового основания под штампом.

Длительные наблюдения и результаты штамповых испытаний, выполненных на ряде объектов строительства мостовых переходов, показали, что качество подготовки грунтового основания в обсадной металлической трубе под штампом с помощью бурильно-крановой установки BAUER VG-30 усту-

пает по качеству подготовки основания виброгрейфером VB-30 [14, 15]. Зачистку забоя под штампом в обсадной трубе рекомендуется производить специальным буровым наконечником – зачистителем в несколько приёмов, с его извлечением с грунтом на поверхность после каждой зачистки и последующей планировкой основания.

Отсутствие требуемого уровня подготовки грунтового основания под штампом отражается на отсутствии рабочего режима давления на испытуемый грунт в течение первых 3,5 ч. В это время происходит обычный предварительный обжим разрыхленного грунта под штампом, и начало его уплотнения сдвигается на кривой $S = f(P)$ от нулевого отсчета. Таким образом, сдвиг нагрузки и осадки испытуемого грунта под штампом на некоторую величину нарушает технологический регламент программы испытаний и проявляется в реализации кривой $S = f(P)$ разрыва, отодвигающего процесс консолидации грунта. Расхождения между расчетными по программе испытаний и измеренными значениями указывают на признак «отрицательной» концентрации напряжений в грунтовом основании под подошвой штампа.

Полный анализ испытаний требует достаточно большого количества нагружений и периодов выдержки во времени и является дорогостоящей операцией, причем стоимость испытаний определяется главным образом их продолжительностью в рамках теории консолидации и практически не зависит от числа нагружений [16, 17]. На основе зависимости между скоростью осадки грунта и временем выдержки под нагрузкой коэффициент консолидации для грунта определяют в первые 0,5–1,0 ч, что ниже закладываемых в типовых программах штамповых испытаний [18].

Оптимизация процесса испытаний изменяет процедуру и не снижает качества полученных экспериментальных значений и их вариации, но приводит к уменьшению расхода времени и стоимости. В процессе штамповых испытаний не всегда целесообразно добиваться каких-то предельных деформаций и осадки грунта под штампом (например, 0,1 мм) за этап нагружения, т. к. более убедительные показания осадки отслеживаются в течение 2–3 этапов нагружения с короткими периодами во времени, при этом модуль осадки (E_p) и общей деформации (E_q) должны быть равны.

Существующая опасность, отмеченная ранее, связана с некачественной подготовкой основания под штампом. Результаты этапов первоначального обжатия разрыхленного грунта реально не отражают процесс возможного выпора грунта под штампом. Для предотвращения этого «эффекта» часть системы засыпается песком в обсадной трубе (см. рис. 4, б).

В связи с тем, что в программах штамповых испытаний, как правило, отсутствуют зависимости между скоростью протекания и сжатия грунта под штампом при нагружении, необходимость определения функциональной зависимости модуля усадки (E_p) от времени (t_p) очевидна для обоснования режимов нагруженности и консолидации (рис. 8), а также определения модуля деформации грунта (E_q) при следующих показателях⁴ [19]: μ – коэффициент

⁴ ГОСТ 5686–2012. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. Москва: Стандартинформ, 2014. 42 с.

Пуассона, принимаем: для крупнообломочных грунтов – 0,27, для песков и супесей – 0,30, для суглинистых – 0,35, для глин и глинистых – 0,42; K_i – коэффициент, принимается для жесткого круглого штампа – 0,79; D – приращение давления на штамп; Δ_s – приращение осадки штампа, соответствующее D в см. За критерий условной стабилизации деформации и консолидации грунтов скорость осадки штампа должна быть не более 0,1 мм за время этапа нагружения t .

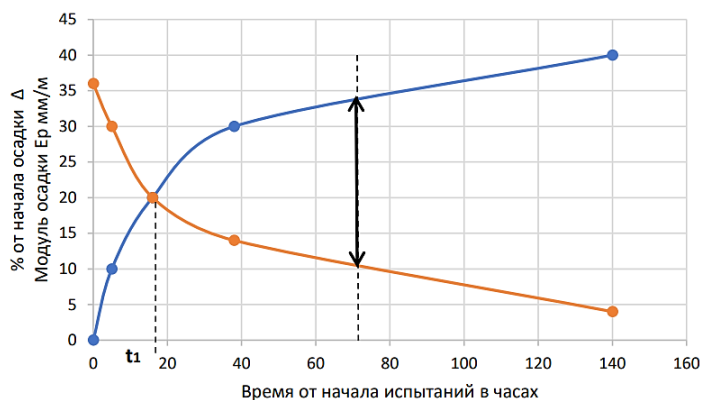


Рис. 8. Время от начала испытания в часах, t_1 – начало консолидации

Fig. 8. Time from start of test, h; t_1 – consolidation initiation

Испытания показали, что при неравномерной осадке грунта в пределах 50 % от ее полной величины коэффициент консолидации $n \approx 1,5$ и сжимаемость грунта соответствует реальной осадке при значении критической удельной нагрузки $P_{кр}^1$, т/м², равной

$$P_{кр}^1 = \gamma \cdot h \operatorname{tg} \varphi \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right). \quad (12)$$

Полную осадку грунта под штампом необходимо прогнозировать с учетом неоднородности грунтовой толщины, имеющей модули сжатия грунта, увеличивающиеся с глубиной⁵ [20]. Это обстоятельство накладывает отпечаток в теоретическом обосновании промежуточных и конечных значений осадки грунта под штампом в процессе этапного нагружения. Теоретически на основе метода последовательных решений справедливо выражение для вычисления осадки

$$\Delta_{si} = (E_{pi+1} - E_{p,i})h, \quad (13)$$

где E_{pi+1} , $E_{p,i}$ – модули осадок последующего и предыдущего слоев грунтового основания; h – отметка залегания грунтов под штампом.

Поскольку объем данных, получаемых в процессе испытания, пропорционален общему числу предельных значений и их вариаций, то продолжитель-

⁵ СП 24.13330–2011. Свайные фундаменты. Москва, 2011, 85 с.

ность испытаний, не снижая качество, можно сократить при достижении требуемых пределов разности значений в их вариациях [20]. Так, например, дрейф разности значений 0,02 мм для вариации нагрузки в интервале 10–12 т указывает на достижение предельных отказов и сокращение времени испытания. Штамповые испытания по грунту относятся к испытаниям со ступенчатым возрастанием нагрузок, но ограниченных по среднему значению деформации осадки грунта под штампом для всех вариаций, доступность и достоверность которых находятся в интервале времени от 6 до 8 ч. Тогда упрощенная схема экономического обоснования штамповых испытаний основана на формуле в следующем виде:

$$C = C_0 + \sum_{i=1}^n V_i t, \quad (14)$$

где C – затраты на проведение испытаний в течение 6–8 ч; n – число штамповых испытаний в кусте свай; C_0 – стоимость свайного ростверка в кусте свайного фундамента в «деле»; V_i – затраты, связанные с режимом обжатия (приработки); t – время приработки.

Рассматривая мосты как объекты экономической зоны ответственности, предлагаем приближенную зависимость определения V_i в виде

$$V_i = (1 - \Theta) / (\gamma \cdot k + \eta), \quad (15)$$

где Θ – коэффициент, зависящий от вида напряженного состояния грунта под штампом; $\gamma < 1$ – коэффициент, указывающий долю затрат на приработку грунтового основания под штампом; $k = 1,4$; η – коэффициент экономической ответственности мостов, равен 0,5 [17].

Заключение

Штамповые испытания грунта при строительстве свайных фундаментов ряда объектов мостовой инфраструктуры в Сибирском регионе Российской Федерации в условиях уплотненных и неуплотненных грунтов позволили построить зависимость $S = f(P)$ с учетом развития пластических деформаций при длительном нагружении на основе математической зависимости Риттера – Рассохина на основе оценки предельных значений средней осадки и сопротивления грунта под подошвой штампа.

Предельная осадка грунта, расчетное давление, при котором происходит стабилизация с предельной деформацией грунта, а также предельное критическое давление на грунт характеризуют процесс деформирования грунта под штампом с учетом сдвига.

Реализация кривой $S = f(P)$ при штамповых испытаниях возможна только при качественном уровне подготовки основания грунта под штампом с дополнительным условием фиксирования зависимости между скоростью протекания сжатия грунта и нагружения, консолидации и сжимаемости грунта. Для практического использования уточнена схема экономического обоснования интервала времени штамповых испытаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мангушев Р.А., Ершов А.В., Осокин А.И. Современные свайные технологии. Москва : Изд-во АСВ, 2010. 240 с.
2. GTS 2012. Analysis Manual. Part I. Analysis Case, 2011. 243 p.
3. Рубцов О.И., Бакалов А.Ю., Кобецкий Д.И. Влияние технологии «ПЕСКОНАСОС» на процессы консолидации и стабилизации в слабых грунтах основания на примере Имеретинской низменности // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 6. С. 148–156.
4. De Vos. M. Innovative design methods in geotechnical engineering // GeoTechNet – European Geotechnical Thematic Network. Part 2. 2010. 13 p.
5. Ржаницын А.Р. Определение экономической безопасности и коэффициентов запаса из экономических соображений // Вопросы безопасности и прочности строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1951. 112 с.
6. Хевиленд Р. Теория надежности и расчет на долговечность. Москва ; Ленинград : Энергия, 1966. С. 232.
7. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. I. Ленинград ; Москва : Государственное изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1959. 356 с.
8. Bruce D.A., Juan I. Drilled and grouted micropiles state of practice review. Springfield, VA, USA, 1997. V. 1–4. NTIS. 115 p.
9. Катцын П.А., Сибир В.В. Проектирование и расчет опор и фундаментов автодорожных мостов. Томск, 1991. 134 с.
10. Почтман Ю.М., Колесниченко А.П. Методы математической оптимизации в механике грунтов. Киев ; Донецк : Головное изд-во издательского объединения «Вища школа», 1977. 102 с.
11. Палкин Ф.П., Нижневясов В.В. Расчет фундаментов мостовых опор. Новосибирск, 1967. 71 с.
12. Гольдштейн М.Н., Царьков А.А., Черкасов И.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Москва : Трансиздат, 1981. 316 с.
13. Глотов Н.М., Луга А.А., Силин К.С., Завриев К.С. Свайные фундаменты. Москва : Транспорт, 1975. 422 с.
14. Силин К.С., Глотов Н.М., Карпинский В.Н. Фундаменты опор мостов из сборного железобетона. Москва : Транспорт, 1968. 317 с.
15. Солохин В.Ф., Дядькин С.Н., Овчинников И.Г., Раткин В.В., Мельников А.Б., Мариков Б.Д., Жаворонков Б.Г. Отечественное мостостроение на рубеже XX–XXI веков. Саратов, 2002. 127 с.
16. Маслов Н.Н. Прикладная механика грунтов. Москва : Изд-во Министерства строительства предприятий машиностроения, 1949. 327 с.
17. Дривинг А.Я. К определению числовых характеристик надежности конструкций сооружений с чисто экономической ответственностью // Проблемы надежности в строительной механике. Вильнюс : РИНТИП, 1968. 63 с.
18. Иванов Г.И., Носков И.В., Слободян А.Д., Госькова Г.С. Основания и фундаменты : справочник / под ред. Г.И. Швецова. Москва : Высшая школа, 1991. 383 с.
19. Design and construction of pile foundations. DIAN, 2004. 192 p.
20. Kenneth L.L. Buckling of partially embedded piles in sand // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions. 1968. № 1. P. 23–26.

REFERENCES

1. Mangushev R.A., Ershov A.V., Osokin A.I. Modern pile technology. Moscow: ASV, 2010. 240 p. (In Russian)
2. GTS 2012. Analysis Manual. Part I Analysis Case, 2011. 243 p.
3. Rubtsov O.I., Bakalov A.Y., Kobetsky D.I. Sand pump technology in consolidation and stabilization of soft soils in the Imeretin Valley. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014; (6): 148–156. (In Russian)

4. De Vos M. Innovative design methods in geotechnical engineering. GeoTechNet – European Geotechnical Thematic Network. Part 2. 2010. 13 p.
5. Rzhantsyn A.R. Economic safety and safety factor from economic viewpoint. In: Problems of safety and durability of building structures. Moscow: Stroyizdat, 1951. 112 p. (In Russian)
6. Haviland R. Engineering reliability and calculation of durability. Moscow; Leningrad: Energia, 1966. 232 p. (In Russian)
7. Florin V.A. Fundamentals of soil mechanics, vol. I. Leningrad; Moscow, 1959. 356 p. (In Russian)
8. Bruce D.A., Juan I. Drilled and grouted micropiles state of practice review, vol. 1–4. Virginia: Springfield, 1997. 115 p.
9. Kattsyn P.A., Sieber V.V. Design and analysis of supports and foundations of road bridges. Tomsk, 1991. 134 p. (In Russian)
10. Pochtman Y.M., Kolesnichenko A.P. Methods of mathematical optimization in soil mechanics. Kiev; Donetsk: Vyshcha Shkola, 1977. 102 p. (In Russian)
11. Palkin F.P., Nizhevyasov V.V. Foundations analysis of bridge supports. Novosibirsk, 1967, 71 p. (In Russian)
12. Goldstein M.N., Tsarkov A.A., Cherkasov I.I. Mechanics of soils, foundations and foundations. Moscow: Transizdat, 1981. 316 p. (In Russian)
13. Glotov N.M., Luga A.A., Silin K.S., Zavriev K.S. Pile foundations. Moscow: Transport, 1975. 422 p. (In Russian)
14. Silin K.S., Glotov N.M., Karpinskiy V.N. Foundations of bridge piers of prefabricated reinforced concrete. Moscow: Transport, 1968. 317 p. (In Russian)
15. Solokhin V.F., Dyadkin S.N., Ovchinnikov I.G., Ratkin V.V., Melnikov A.B., Zhavoronkov B.G. National bridge construction at the turn of 20th–21st centuries. Saratov, 2002. 127 p. (In Russian)
16. Maslov N.N. Applied mechanics of soils. Moscow, 1949. 327 p. (In Russian)
17. Dreving A.Y. Determination of numerical characteristics of reliability of structures with purely economic responsibility. In: Problems of Reliability in Structural Mechanics. Vilnius, 1968. 63 p. (In Russian)
18. Ivanov G.I., Noskov I.V., Slobodian A.D., Guskova G.S. Foundations. Handbook. G.I. Shvetsov ed., Moscow: Vysshaya Shkola, 1991. 383 p. (In Russian)
19. Design and construction of pile foundations. DIAN, 2004. 192 p.
20. Kenneth L.L. Buckling of partially embedded piles in sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions*. 1968; (1): 23–26.

Сведения об авторах

Картопольцев Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Картопольцев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Алексеев Александр Аверьянович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2, alekseev10@yandex.ru

Authors Details

Vladimir M. Kartopoltsev, DSc, Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Audrey V. Kartopoltsev, PhD, A/Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Aleksandr A. Alekseev, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alekseev10@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.03.2023
Одобрена после рецензирования 28.03.2023
Принята к публикации 29.03.2023

Submitted for publication 20.03.2023
Approved after review 28.03.2023
Accepted for publication 29.03.2023