Determination of the screw pile load-carrying capacity by torque

A.G. Alekseevа,

*a N.M. Gersevanov NIIOSP, Russia*

S.G. Bezvolevа

Abstract: The paper characterizes the state of the issue of designing effective structures of screw piles, testifying to the relevance of this scientific and technical problem in conditions of insufficient development of the existing norms. The technique of determining load-carrying capacity of a pile by the moment of screwing fixed during its immersion is considered. The correlation coefficient formula and the technique of determining the ultimate soil contact friction on the side surface of several types of screw piles developed as part of the advancement in solving the research problem are presented.

**1. Introduction**

At the present time, large construction companies (A.B.Chance Co., etc.) which use helical piles (HC) have the practice of controlling the bearing capacity of SC Fu by the value of the screwing resistance torque Tk fixed during their immersion at the construction site due to the generalization of data on the objects. Even in the absence of normative expressions for the transient dependence Fu = f(Tk), the method of measuring Tk and the determination of this dependence on a particular site allows to reduce the number of control piles at expensive field static tests. For this purpose, in the Russian practice, according to [1], individual special technical specifications (STS) are developed for design of foundations made of HS at individual construction sites. In order to develop normative dependences for f(Tk) allowed for use in designing or to develop a corporate standard of the organization (STO), it is necessary to develop a justification for specific types of ACs and soil conditions.

**1. The analysis of the state of the issue** is performed on the basis of the research data of NIIOSP [2-4, etc.], thematic review articles [5] and capital monographs [6,7].

According to the current Russian regulatory document SP 24.13330.2011 [8] for helical piles (BC) is allowed to determine the bearing capacity of soils based on the results of static testing of natural piles and using the recommended in [8] for certain types of BC algorithms for calculating the strength characteristics of soil found during the survey.

The most reliable method for determining the bearing capacity of piles is the method of field static tests, at the same time it is the most costly both financially and in terms of time. When applying the calculation methods, there is a question of applicability of the existing calculation algorithms to VS of different types (Fig. 1), because VS size (configuration, number of propeller blades, distance between them, etc.) largely determines the mechanism of the propeller pile. However, analytical methods of calculation [8] are actually developed on the basis of researches only of single helical wide-bladed AC (Fig.1.1a). In addition, in these methods there are inevitable errors associated with the definition of soil characteristics, as well as their averaging over a large volume of heterogeneous soil mass.

The general disadvantage of the recommended methods [8] is the lack of control over the bearing capacity of each pile being installed, which is especially relevant for the building area with heterogeneous engineering and geological conditions.

One of the peculiarities of BC foundations arrangement is the possibility to measure the Tk required for pile driving. The presence of correlation between Fu VS at static compressive and

выдергивающих нагрузках и Тk, прикладываемым при ее погружении, было выявлено, начиная с 1960-х годов компаниями - застройщиками в различных странах на значительном количестве объектов. Наличие такой зависимости объясняется тем, что Тk, необходимый для погружения ВС, также как и её *Fu* определяется прочностью грунта.

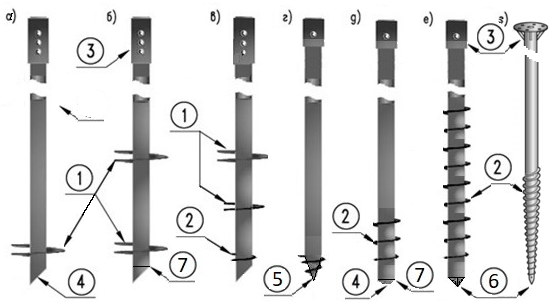
****

Fig. 1.1. Main types of aircraft produced in Russia and features of their design:

a) single-blade with one working blade, formed by a coil spiral, wide-blade (d/D<0,6); b) multi-blade (two-blade example) cylindrical (with the same blade diameter) wide-blade; c) multi-blade (three-blade example) cone (with different blade diameters); d) single-blade with a solid conical tip with a cone spiral; e) multi-coiled narrow-bladed (d/D>0,6) with open sharpened or cutting shaft end; f) also with closed end; h) also with elongated conic point with conic spiral; 1 - single-coiled blade; 1 - single-coil blade; 2 - multi-coil blade; 3 - mounting head; 4 - open cut and sharpened shaft end; 5 - closed conical point with conical spiral; 6 - sharpened or cutting closed shaft end; 7 - stopper on open shaft end.

The formula [9] is usually used for the experimental estimation of the calculated Fu VS by Tk, necessary for its immersion

Fu =*К*t *Т*k, (1)

where *Kt* is the coefficient of proportionality.

In works [6,7,9-12] the values of Kt, as well as the factors determining it, were studied for different types of WS in different soil conditions. In [9] the results of full-scale tests on static pulling loads of 91 piles with the number of turns from 2 to 14 and blade diameters from 152 to 508 mm, performed at 24 different sites were considered. Based on the data obtained in [9], it was assumed that the Kt coefficient depends mainly on the diameter of the pile shaft.

In [7] an analysis of the results of more than 300 tests of the CS in different engineering-geological conditions was carried out. Within the framework of testing the hypothesis [9] that the Kt coefficient depends mainly on the diameter of the pile shaft, a correlation formula was obtained

*К*t = lk /*def*m, (2)

where *def* is the effective diameter of the pile shaft (for a circular cross-section equals the diameter, for a square cross-section equals the length of the diagonal); *m* is a power factor equal to 0.92; *lk* is a coefficient equal to 1433 mmm/m.

It turned out that dependence (2) has a very low coefficient of determination (R2) equal to 0.64, therefore, the coefficient Kt depends significantly on other parameters besides the diameter of the pile shaft.

To analyze the parameters influencing the Kt coefficient, in [7] the dependence

*К*t = H/*def* . (3)

in which the parameter *H* turned out to depend mainly on the diameter of the AC barrel, the diameter, pitch and thickness of its propeller blade, the type of ground and, insignificantly, on the number of coils of the propeller blade, as well as the values of the axial load and torque.

In [10] the results of full-scale tests of 19 VS on one site with sandy soil and on two sites with dusty-clayey soils are presented. Were tested CS with a square cross-section shaft with a diagonal of 45 mm and three welded blades with diameters of 200, 250 and 300 mm, spaced along the length of the trunk. In [10] it was concluded that the value of Kt coefficient largely depends on the direction of the force on the pile and on the type of soil.

The article [11] presents laboratory tests of model VS on pulling out in a centrifuge in sands of different density. The results showed that the value of *Kt* coefficient depends on relative density of sand, size of barrel and blades of AC and does not depend on their number. The authors developed a formula

*К*t =2/(*dсtan(dr*+*q))*, (4)

where *dr* is the angle of metal-sand friction; *dc*, *q* are parameters depending on the diameter of the pile barrel, diameter and pitch of the propeller blade.

A comparison of formulas (2) - (4) shows their common empirical basis. In particular, (2) and (4) can be reduced to the more general form (3).

In Russian practice, the connection between the load-carrying capacity of the VS and the torque was considered by Zhelezkov V.N. in his monograph [6]. The dependence of the Kt coefficient on the load direction and on the physical and mechanical characteristics of the soil was revealed. Dependence on AC configuration was not obtained due to insignificant difference in geometric dimensions of blades and barrels of tested AC.

The above analysis of the works testifies to sufficient validity of the method of determining the load-carrying capacity of AC according to the value of the torque required for its twisting. Corresponding dependence (1) with proportionality coefficient *Kt* is qualitatively confirmed by numerous experimental and theoretical studies. Quantitative coincidence of calculated and experimental results is determined by reliability of coefficients used for calculations, which connect bearing capacity of a pile and the value of torsion torque. To develop normative dependences for calculations of *Kt* coefficients acceptable for use in designing, it is necessary to carry out experimental researches for each used type of CS in different soil conditions.

The fundamental disadvantage of a set of published [6,7,9-12, etc.] data is a different, often uncertain approach to estimating the value (criterion) of the load-carrying capacity of the BC according to the test data *Fu* and differences in their methodology (continuous loading, stepped, accelerated, prolonged). At the moment in geotechnical practice dozens of different criteria of test value *Fu* is used. Significant uncertainty is created by the influence of differences in the structures of the tested CSs and the immersion methods (rotation speed, the value of the axial load, etc.), including the value of the torque of resistance to twisting *Tk*.

For these reasons, the use of published [6,7,9-12, etc.] data on the values of *Tk* and the correlation *Tk* - *Fu* to check the theoretical dependence of Tk and calibration of the correlation dependence *Tk* - *Fu* seems difficult because it is almost impossible to perform the selection of results satisfying the criteria and methods adopted in the regulatory documents of the Russian Federation, as well as the unavailability of materials on the characteristics of the tested soils of the required volume.

**2. Theoretical foundations of the development performed**

In this study, we limit ourselves to structures close to the cylindrical shape of Fig. 2g-h, which we will call a bored screwed pile (BZP).

BZS made of a metal pipe with a spiral winding and a closed cutting tip with an angle of sharpening of 60°, plunged into the ground by rotation **combined with** indentation has found application in domestic practice as a bearing element of foundation or fencing [13]. Simple domestic equipment makes it possible to successfully sink such structures with a pipe diameter of 600 mm up to 12 m long even in very dense and strong soils [13].

В последнее время внедряются в России близкие к БЗС зарубежные сваи винтовые конусно-спиральные (СВКС) «BAU» [14] у которых спиральная навивка выполняется на удлиненной конусной части. СВКС длиной до 3-3,5 м и диаметром трубчатого ствола до 108-133 мм погружаются небольшим крутящим моментом с использованием маломощного вращателя. Кроме транспортного строительства устройство таких микросвай весьма популярно в нише малого предпринимательства для быстрого возведения небольших зданий и сооружений, например, с/х объектов или жилых коттеджей.

Выполненный в НИИОСПе теоретический анализ механизма погружения ВС [2] показывает, что момент завинчивания *Tk* определяется в основном контактным трением грунта у поверхностей цилиндрического вала *ts*, круговых лопастей *tfi* и грунтового ядра у острия вала *tfl*. При рассмотрении БЗС для достижения необходимого упрощения пренебрегаем менее значительными факторами, в частности трением по поверхностям кромок *tti* и сопротивлением грунта резанию кромкой лобовой (нижней) лопасти *st1*, наклоном спирали лопастей и конусом острия, а также величиной *tfi* характерных для зауженных (*d*/*D*>0,8) лопастей (спирали) БЗС. Весьма сложные, фактически непригодные для практического применения и, на наш взгляд, спорные выражения по учету этих факторов даны в [6]. Отметим также, что в конце погружения трение у острия вала *tfl* по лобовой поверхности, заведомо меньше бокового трения *tsl* о внутреннюю поверхность вала грунтовой «пробки», образующейся в процессе завинчивания внутри вала у острия.

Исходя из указанного механизма погружения БЗС имеем следующее выражение для *Tk*

 (5)

где *r* - радиус трубчатого вала (ствола) с учетом спирали БЗС; *l* - рабочая (погруженная в грунт) длина БЗС.

Вырождение второго слагаемого (5) при выдергивании БЗС означает прямую пропорциональность между соответствующим предельным сопротивлением грунта *Fu* и моментом завинчивания *Fu*=*Tk/r*.Таким образом, в этом случае коэффициент *Kt* зависимости (1) определяется теоретически по формуле *Kt* =1/*r*, а для зависимостей (2) и (3) получаем l*k**=Н*=2, def*=*2*r* и *m=*1.

Согласно представленному анализу обработку данных статических испытаний БЗС к определению корреляционной зависимости несущей способности ВС от крутящего момента завинчивания целесообразно производить на основе выражения

 , (6)

где *Fu*,*n* - частное значение несущей способности погруженной БЗС по грунту на вертикальную нагрузку; *Tk*,*n* - зафиксированный при погружении ВС на проектную отметку крутящий момент завинчивания; *Kf* - безразмерный параметр корреляции.

Отсутствие размерности демонстрирует очевидное преимущество параметра *Kf* по сравнению с подробно рассмотренным выше размерным коэффициентом пропорциональности *Kt* (формул (3) и (4) над (1) и (2)). Таким образом, разработанное уравнение позволило теоретически подтвердить целесообразность использования эмпирической формулы (3) которая совпадает с (4) при *def*=2*r* и *H*=2*Kf*. Благодаря выделению основного влияния сечения вала (3) и (4) безразмерный параметр корреляциипозволяет лучшим образом отразить влияние других факторов.

Для СВКС марки FM24 c диаметром ствола *d*=76,2 мм в [15] представлен комплекс исследований, включающий опытное погружение и статические испытания СВКС на экспериментальной площадке сложенной лессовидной твердой супесью. Испытано по 2 сваи длиной *l* 1,5; 2, 2,5, 3 и 3,5 м с нижней конусной частью высотой 55 см. На последних 50-ти см погружения сваи фиксировалась средняя величина крутящего момента *T*k.

Испытания проводились по методике стандарта [16] с учетом указаний норм [8]. Статическая нагрузка доводилась до значения, при котором осадка составляла не менее 40 мм. При этой осадке во всех опытах достигалась продавливание сваи, и частное значение предельного сопротивления сваи *F*d принималась равным предшествующей величине нагрузке, при которой стабилизированная осадка сваи составляла от 4 до 13 мм. Сводка величин измеренных *T*k и установленных *F*d приведена в таблице.

Статистическая обработка [15] полученного ряда данных *F*d - *T*k по степенной модели парной (однофакторной) регрессии привела к двухпараметрической зависимости *F*d = 24,845 *T*k0,961 с коэффициентами детерминации *R*2 =0,986 и вариации v=0,040. Близость к 1

Таблица - Результаты испытаний СВКC [15]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | *l*, мм | *F*d, кН | *T*k, кН·м |
| 1 | 1500 | 20,0 | 0,8 |
| 2 | 1500 | 22,5 | 0,91 |
| 3 | 2000 | 28,0 | 1,21 |
| 4 | 2000 | 28,0 | 1,08 |
| 5 | 2500 | 40,0 | 1,65 |
| 6 | 2500 | 35,0 | 1,42 |
| 7 | 3000 | 42,0 | 1,61 |
| 8 | 3000 | 36,0 | 1,5 |
| 9 | 3500 | 52,5 | 2,25 |
| 10 | 3500 | 52,5 | 2,15 |

степенного показателя m=0,961 этой зависимости подверждает сделанное выше предположение о прямой линейной кореляции *F*u - *M*u для БЗС. Так проведенная нами альтернативная статистическая обработка c выбором m=1 привела к однопараметрической зависимости *F*d = 24,552*T*k с коэффициентами детерминации *R*2 =0,983 и вариации v=0,042. Таким образом обе зависимости обладают отличными и практически эквивалентными показателями (рис.2). Некоторое отклонение у прямой

.

однопараметрической зависимости коэффициента Kt=24,552 м-1 от теоретического значения Kt=2/*d*=26,247 м-1 видимо обуславливается лобовой работой конусной части СВКС при ее вдавливании.

Например, полученная выше для БЗС в лессовидной супеси однопараметрическая зависимость *F*d = 24,552*T*k , преобразуется к *F*d = 0,935*T*k/*r* , которая показывает, что влияние других факторов составляет 6,5%.

Отслеживание измеряемых значений момента завинчивания *Mu*,*n* по мере погружения БЗС и их сопоставление с рассчитанными по (5) величинами *Mu* является эффективным способом оценки прочностных свойств грунтов в их природном залегании [2].

В простейшем случае БЗС (см.рис.1,г-з) обратным расчетом из формулы (5) можно определить распределение по длине сваи (глубине грунтового основания) удельного контактного трения грунта о боковую поверхность стального вала сваи *ts*. В частности, пренебрегая незначительным изменением с глубиной *tf*, последовательно определяя *ts*,*i* для каждого отрезка глубины *dzi* по *dMu*,*i*

*ts*,*i* = *dMu*,*i/А/dzi , А=2pr*2; .(7)

Такое определение *ts* имеет большое практическое значение, так как допускаемое [8] использование для ВС табличных величин *ts* установленных для боковой поверхности ж/б забивных свай (*f* табл.7.3 [8]) теоретически не корректно. В этой связи отметим, что в современных нормах Республики Беларусь [17] при расчете ВС величины *f* установлены по данным обработки результатов испытаний грунтов стальными сваями.

С использованием данных [15] (таблица) и формулы (5) получен представленный на рис.3 график изменения *ts*(*f*) по длине СВКС погруженной в лессовидную твердую супесь.

Сопоставление риc.3 полученных *ts* с величинами *f,* полученными по данным табл.7.3 [8], подтверждает адекватность разработанной методики обратного расчета. Так, средние величины *ts* и *f* в общем интервале глубин близки друг к другу. При этом рост *ts* с глубиной значительно интенсивней, чем у *f* , что согласуется с обобщенными опытными данными [18].

Заключение

Проведенный теоретический анализ показал целесообразность использования для определения несущей способности винтовой сваи *Fu*,*n* по величине необходимого для ее закручивания крутящего момента *Mu*,*n* полученной зависимости (6). Благодаря выделению основного влияния радиуса вала безразмерный параметр корреляции *Kf* позволяет лучшим образом отразить влияние других факторов. Отличие величины *Kf* от 1 показывает степень влияния других факторов, в частности роль в несущей способности ВС работы лопастей и острия.

В простейшем случае бурозавинчиваемой сваи (БЗС) рекуррентным расчетом по формуле (7) можно определять распределение по длине сваи (глубине грунтового основания) удельного контактного трения грунта о боковую поверхность стального вала сваи *ts*. Такое определение *ts* имеет большое практическое значение, так как используемое нормами [8] для ВС величин *ts* установленных для боковой поверхности ж/б забивных свай (*f* табл.7.3 [8]) теоретически не корректно. По результатам обработки результатов испытаний грунтов посредством БЗС могут быть установлены надежные и рациональные нормативные величины *f* для боковой поверхности стальных ВС.

**Список литературы**

1. Градостроительный кодекс РФ от 29.12.2004 г. №190-ФЗ с доп. и изм.; Технический регламент РФ о безопасности зданий и сооружений от 30.12. 2009 г. № 384-ФЗ.

2. Алексеев А.Г., Безволев С.Г., Сазонов П.М. Опыт применения многолопастных винтовых свай в пылевато-глинистом грунтовом основании// «ОФМГ». - 2018. - № 5. - С.8-15.

3. Алексеев А.Г., Безволев С.Г. Адаптация к требованиям инженерной практики методики расчета винтовых свай с применением ПК PLAXIS// «ОФМГ». - 2020. - № 1. - С.23-28.

4. Алексеев А. Г., Безволев С. Г., Сазонов П. М., Звездов А. А. О необходимости исследований работы винтовых свай и актуализации норм проектирования свайно-винтовых фундаментов// Промышленное и гражданское строительство.- 2018.- № 1.- С. 43-47.

5. Халтурин А.Ю. Определение несущей способности винтовых свай по величине крутящего момента// Ползуновский Вестник.- 2012.- №1/2 .- С.118-121.

6. Железков В.Н. Винтовые сваи в энергетической и других отраслях строительства.- СПб: «Прагма».- 2004.- 150 с.

7. Perko H. A. Helical Piles: A practical guide to design and installation. - New Jersey: John Wiley and Sons, 2009. - 512 p.

8. СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты/ Минстрой РФ; НИИОСП им. Герсеванова.

9. Hoyt R.M., Clemence S.P. Uplift Capacity of Helical Anchors in Soil// Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, 1989. Vol.2.- P.1019-1022.

10. Livneh B., Naggar M.H. Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading// Canadian Geotechnical Journal. - 2008. - Vol.45, №8. - P.1142-1155.

11. Tsuha C.H.C., Aoki N. Relationship between installation torque and uplift capacity of deep helical piles in sand// Canadian Geotechnical Journal. - 2010. - Vol. 47, №6. - P.635-647.

12. Ghaly A. Drivability and pullout resistance of helical units in saturated sands// Soils and Foundations. - 1995. - Vol.35, №2. - P.61-66.

13. Рекомендации по расчету, проектированию и устройству свайных фундаментов нового типа в г.Москве/Правительство Москвы; Москомархитектура.- М., 1997.- 92 с.

14. Рекомендации по проектированию винтовых свай «BAU» для гражданских, промышленных и инженерных сооружений: Р. BAU.01.09.11 / Алтайская Госэкспертиза.- Новосибирск, 2011.- 21 с.

15. Носков И.В.и др. Определение несущей способности свай винтовых конусно-спиральных по действию крутящего момента// Вестник СБИУ.- 2019.- № 2 (49).- С.66-75.

16. ГОСТ 5686-2012 Грунты. Методы полевых испытаний сваями.

17. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-5.01-254-2012 Основания и фундаменты зданий и сооружений. Основные положения./ Минстрой-архитектуры РБ.

18. Глотов Н.М. и др. Свайные фундаменты.- М.: Транспорт, 1975.- 432 с.