

УДК 624.154

А.С. Буслов, А.А. Бакулина

ФГБОУ ВПО «МГОУ им. В.С. Черномырдина»

ВЛИЯНИЕ КОЛЬЦЕВОГО УШИРЕНИЯ НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННОЙ МОНОСВАЙНОЙ ОПОРЫ

На основе разработанного авторами аналитического метода расчета приведены данные о влиянии кольцевого уширения, устраиваемого в верхней сжимаемой зоне грунта, на несущую способность горизонтально нагруженных моносвайных опор. Показано, что в формировании дополнительного сопротивления горизонтально нагруженной сваи участвует как фронтальная поверхность кольцевого уширения, так и его подошва за счет возникновения сил трения по контакту ее с грунтом при горизонтальном перемещении и вертикального отпора при крене плиты под действием моментной нагрузки. Устройство в верхней сдвигаемой зоне грунта кольцевого уширения может давать значительное (до 40 %) повышение несущей способности горизонтально нагруженной сваи и снижение расхода бетона по сравнению со сваями постоянного сечения при равных значениях их несущих способностей.

Ключевые слова: моносвайная опора, горизонтальная нагрузка, кольцевое уширение, несущая способность.

Фундаменты одноэтажных горизонтально нагруженных опор имеют широкое распространение в практике строительства опор линий электропередач, опор контактных линий подвижного состава, моносвайных фундаментов ветровых электростанций и т.п.

При повороте опоры под действием горизонтальных сил и моментов наиболее нагруженной является зона у дневной поверхности грунта, в связи с чем в ней возникают пластические деформации в виде местного выпора грунта.

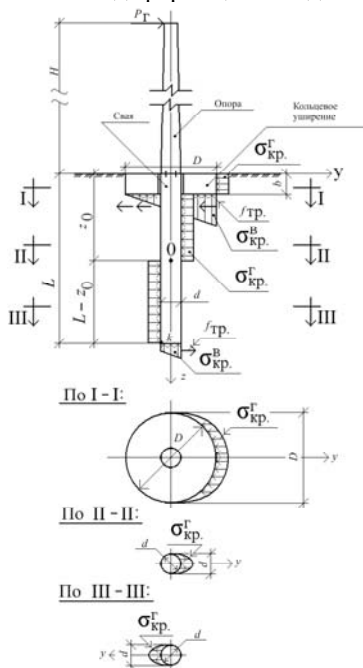


Рис. 1. Расчетная схема горизонтально нагруженной сваи с кольцевым уширением в верхней сдвигаемой зоне

Для повышения деформационно-прочностной устойчивости горизонтально нагруженных одноэтажных опор применяются различного рода лежневые конструкции в виде отдельных балок, брусов и т.п., устраиваемых со стороны, противоположной действующей нагрузке или моменту [1]. В случае воздействия знакопеременных горизонтальных нагрузок и моментов эффективным является применение кольцевого уширения в верхней ослабленной сжимаемой зоне грунта.

Наряду с имеющимися в литературе и инженерной практике методами расчета фундаментных опор на горизонтальную нагрузку, остается практически неизученным вопрос о влиянии кольцевых уширений, их геометрических размеров на работу горизонтально нагруженных свай [2].

В предлагаемой работе на основе разработанного авторами аналитического метода расчета приводятся данные о влиянии кольцевого уширения, устраиваемого в верхней сжимаемой зоне грунта, на несущую способность горизонтально нагруженных моносвайных опор.

Расчетная схема горизонтально нагруженной моносвайной опоры приведена на рис. 1.

Критическая нагрузка на сваю определялась на основе составления уравнений равновесия моментов и горизонтальных сил относительно т. к.

Для определения предельного сопротивления горизонтально нагруженной на высоте H сваи получены две равнозначные зависимости:

$$1. P_{кр}^r = \frac{\sigma_{кр} d \left(Z_0 L - Z_0^2 - \frac{L^2}{2} + A \right)}{H + L}, \quad (1)$$

где

$$A = \left[b \left(L - \frac{b^2}{2} \right) (\alpha - 1) + \frac{\pi d^2}{12} \left(1 + \frac{1}{4} (\alpha^2 - 1) (2\alpha - 1) \right) + \beta \frac{\pi d}{4} (\alpha^2 - 1) (L - b) \right], \quad (2)$$

$$\text{где } \alpha = D/d; \quad (3)$$

$$\beta = \frac{f_{тр}}{\sigma_{кр}}. \quad (4)$$

$$B = \left[b(\alpha - 1) + \beta \frac{\pi d}{4} \alpha^2 \right]; \quad (5)$$

$$Z_0 = \sqrt{H^2 + 0,5C} - H; \quad (6)$$

$$C = [L^2 + 2H(L - B) - 2LB + 2A]. \quad (7)$$

$$2. P_{кр}^r = \sigma_{кр} d [2Z_0 - L + B]. \quad (8)$$

Геометрические размеры указаны на рис. 1, $f_{тр}$ — силы трения грунта, возникающих на контакте с кольцевым уширением; $\sigma_{кр}$ — предельное сопротивление грунта при вдавливании штампа [1].

Ниже приводятся результаты аналитических исследований влияния геометрических параметров кольцевого уширения на несущую способность горизонтально нагруженной моносвайной опоры.

Влияние диаметра кольцевого уширения. Разработанные теоретические зависимости дают возможность провести исследования влияния геометрических параметров кольцевого уширения на несущую способность горизонтально нагруженных свай в сочетании с различными схемами их загрузки. На их основе можно определить оптимальные размеры диаметра и толщины кольца с точки зрения соотношения несущей способности и затрат бетона на устройство свайной опоры, в т.ч. при различной высоте приложения горизонтальной нагрузки.

В качестве исходного принят вариант буронабивной сваи диаметром $d = 40$ см, глубина погружения $L = 200$ см, $\alpha = 1$ (отсутствие уширения). Грунт — суглинок, полутвердой консистенции, угол внутреннего трения $\varphi = 20^\circ$, сцепление $c = 0,05$ МПа. Горизонтальная нагрузка приложена у поверхности грунта, т.е. $H = 0$. Предельное сопротивление грунта принимаем в соответствии с формулой, приведенной в [3], $\sigma_{кр} = \pi c^3 \operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\varphi) = 0,457$ МПа. Также принято, что $\beta = f_{тр}/\sigma_{кр} = 0,1$.

Далее были произведены расчеты для принятых исходных данных, но с различными вариантами размеров диаметра кольцевого уширения при постоянной толщине уширения, равной 20 см ($0,1L$).

Результаты расчетов сведены в табл. 1. Варианты диаметров приведены в относительных величинах $\alpha = D/d$.

Табл. 1. Влияние диаметра кольцевого уширения D на увеличение несущей способности $P_{кр}$ горизонтально нагруженной свайной опоры $d = 40$ см; $L = 200$ см; $b = 20$ см; $H = 0$

$\alpha = D/d$	1,0	1,25	1,4	1,5	1,6	1,75	2,0	2,5
$P_{кр}$, кН	155,5	166,1	175,1	181,0	187,2	196,0	254,4	259,0
$P_{кр,i}/P_{кр,\alpha=1}$	1,0	1,076	1,13	1,17	1,21	1,26	1,39	1,68

Как видно из представленной таблицы, при размере диаметра кольца, равном двум диаметрам сваи и толщине $0,1L$, ее несущая способность повышается до 40 %, что уже имеет большое практическое значение.

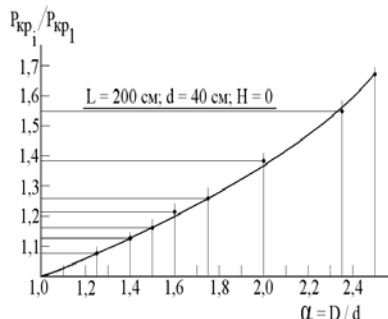


Рис. 2. Влияние увеличения диаметра D кольцевого уширения на повышение несущей способности в величинах $P_{кр,i}/P_{кр,\alpha=1}$ горизонтально нагруженной сваи диаметром d

На рис. 2 представлен график зависимости относительного увеличения несущей способности горизонтально нагруженной сваи $P_{кр,i}/P_{кр,\alpha=1}$ от отношения диаметров кольца и сваи $\alpha = D/d$. Видно, что зависимость носит нелинейно возрастающий характер. Это свидетельствует о влиянии на общую величину несущей способности отпора грунта по подошве кольцевого уширения по мере увеличения его диаметра.

Подтверждением этого факта служат данные табл. 2, где несущая способность опоры при радиусе уширения, равном $2,5d$, почти на 70 % выше, чем у опоры без уширения.

Эффективность свай с кольцевым уширением может быть оценена по величине расхода бетона на ее устройство в сравнении с объемом материала на сваю одного по всей длине диаметра и с той же несущей способностью.

Объем бетона на сваю длиной L , диаметра d , выполненной с кольцевым уширением диаметром D , рассчитывается по формуле

$$V_{к.у.} = 0,25\pi d^2 [L + b(\alpha^2 - 1)]. \quad (9)$$

Диаметр d сваи той же длины и несущей способности, но без уширения определится из уравнения (8), представленного в виде

$$P_{кр} = 2Z_0\sigma_{кр}d - \sigma_{кр}dL + 0,25\pi\beta\sigma_{кр}d^2, \quad (10)$$

откуда

$$d = \sqrt{0,25p^2 - q} - 0,5p, \quad (11)$$

где

$$p = \frac{2Z_0 - L}{0,25\pi\beta}; \quad (12)$$

$$q = -\frac{P_{кр}}{0,25\pi\beta\sigma_{кр}}. \quad (13)$$

В табл. 2 представлены результаты расчетов объема бетона V_1 на сваю диаметром $d_1 = 40$ см с кольцевым уширением различных диаметров D в сравнении с объемом V_2 для сваи постоянного поперечного сечения по длине с диаметром d_2 при равенстве несущих способностей обеих опор.

Табл. 2. Сравнение объемов бетона для свай с уширением и без уширения

$\alpha = D/d_1$	1,0	1,25	1,4	1,5	1,6	1,75	2,0	2,5
$P_{кр}$, кН	15,44	16,6	17,5	18,1	18,7	19,6	21,54	25,9
V_1 , м ³	0,251	0,265	0,275	0,282	0,290	0,302	0,326	0,382
d_2 , см	40	43,5	45,7	47,8	48,9	50,0	55,7	66,2
V_2 , м ³	0,251	0,297	0,328	0,359	0,375	0,392	0,487	0,688
Отношение V_1/V_2	1,0	0,89	0,84	0,78	0,77	0,77	0,67	0,56

Из приведенных в табл. 2 данных видно, что сваи с уширением значительно экономичней (свыше 40 % при $\alpha = 2,5$) по расходу материала по сравнению со сваями постоянного сечения при равных значениях их несущих способностей.

Влияние толщины кольцевого уширения. На основе разработанных теоретических зависимостей также можно проследить, как влияет на несущую способность горизонтально нагруженной сваи толщина кольцевого уширения при неизменном ее диаметре D .

На рис. 3 приведены графики, показывающие изменение несущей способности горизонтально нагруженной опоры в зависимости от увеличения диаметра D и толщины b кольцевого уширения.

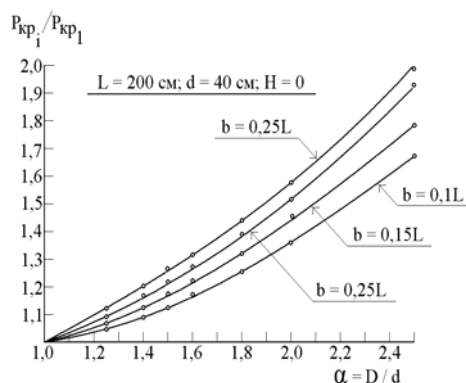


Рис. 3. Графики зависимостей в относительных величинах несущей способности $P_{кр}$ горизонтально нагруженной сваи от ширины b и толщины D кольцевого уширения

нагрузкой, которая может быть заменена эквивалентной системой, состоящей из суммарной горизонтальной нагрузки и плеча ее приложения над поверхностью грунта. Поэтому целесообразно проанализировать, насколько эффективно использование свай с кольцевым уширением в случаях изменения высоты приложения горизонтальной нагрузки на свайную опору.

На графиках (рис. 4) показано изменение несущей способности сваи в величинах $P_{\alpha}/P_{\alpha=1}$ в зависимости от высоты приложения горизонтальной нагрузки при различных значениях относительного уширения $\alpha = D/d$.

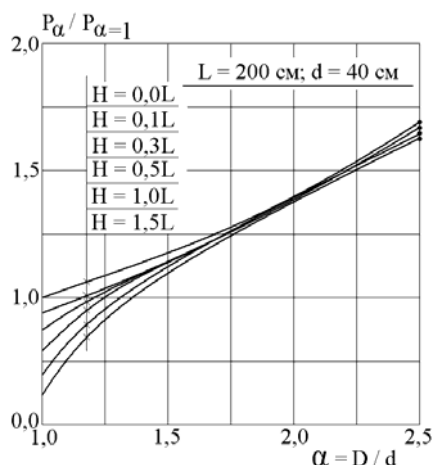


Рис. 4. Графики изменения несущей способности сваи в величинах $P_{\alpha}/P_{\alpha=1}$ в зависимости от высоты H приложения горизонтальной нагрузки при различных значениях относительного уширения $\alpha = D/d$

Анализ показывает, что эффективность влияния утолщения кольца на повышение несущей способности сваи постепенно уменьшается, поэтому параметры диаметра и толщины кольцевого уширения сваи необходимо назначать с точки зрения оптимального сочетания ее несущей способности и расхода бетона на опору.

Влияние высоты приложения горизонтальной нагрузки. Предыдущий анализ работы горизонтально нагруженных свай с кольцевым уширением проводился для случаев, когда сила была приложена у поверхности грунта, т.е. при $H = 0$. На практике одностоечные опоры нагружаются горизонтальной силой при $H \geq 0$, а также моментной

Видно, что с увеличением плеча приложения нагрузки несущая способность горизонтально нагруженной сваи снижается. Такое же действие будет оказывать и моментная нагрузка, приложенная к свайной опоре. При этом относительное снижение несущей способности для свай с уширением, т.е. с переменным диаметром, практически не отличается от свай с одинаковым по всей длине диаметром. Это свидетельствует о том, что по расходу бетона свая с уширением экономичнее свай постоянного поперечного сечения.

Выводы. 1. Устройство кольцевого уширения в верхней сдвигаемой зоне грунта может давать значительное повышение устойчивости горизонтально нагруженной сваи. В приведенном примере расчета при размере диаметра кольца, равном $2d$ сваи и толщине $0,1L$, ее несущая способность повышается до 40 %.

2. В формировании дополнительного сопротивления горизонтально нагруженной сваи участвуют как фронтальная поверхность кольцевого уширения, так и его подошва за счет возникновения сил трения по контакту ее с грунтом при горизонтальном перемещении и вертикального отпора при крене плиты под действием моментной нагрузки.

3. Установлено, что с увеличением диаметра уширения роль вертикального отпора грунта по подошве кольцевого уширения в общей величине несущей способности свайной опоры увеличивается.

4. Сваи с уширением значительно экономичней (свыше 40 % при $\alpha = 2,5$) по расходу материала по сравнению со сваями постоянного сечения при равных значениях их несущих способностей.

Библиографический список

1. Нормы проектирования контактной сети. 141—99. МПС РФ. М., 2001.
2. Матус Н.Ю. К расчету горизонтально нагруженной сваи-колонны с низким ростверком-оголовком. ООО «ГТ Проект — Украина». Одесса. 8 с.
3. Буслов А.С., Тулаков Э.С. Расчет горизонтально нагруженных одностоечных опор по устойчивости // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2004. № 3. С. 6—9.

Поступила в редакцию в феврале 2012 г.

Об авторах: **Буслов Анатолий Семенович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного производства, оснований и фундаментов, ФГБОУ ВПО «Московский государственный открытый университет им. В.С. Черномырдина», г. Москва, ул. Павла Карчагина, д. 22, (495) 316-39-64, a.buslov@yandex.ru;

Бакулина Александра Александровна — старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Рязанский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Московский государственный открытый университет им. В.С. Черномырдина», 390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, д. 26/53, alexandrakulina@yandex.

Для цитирования: Буслов А.С., Бакулина А.А. Влияние кольцевого уширения на несущую способность горизонтально нагруженной моносвайной опоры // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 63—68.

A.S. Buslov, A.A. Bakulina

INFLUENCE OF A ROUND CAP ON THE BEARING CAPACITY OF A LATERALLY LOADED PILE

Foundations of laterally loaded single piles are widely used as part of power transmission lines, wind power stations, highway structures, etc. Ongoing pressure applied to a laterally loaded pile, particularly at the ground level, causes the soil deformation characterized by the bulging of the soil surface.

In the majority of cases, the deformation strength of a pile depends on the front-face soil resistance. Horizontal beams, ground caps or rigid plates are used to increase the pile resistance. An effective method of pressure reduction contemplates the use of a rigid round cap at the front-face or upper level of the soil.

In this paper, the authors analyse the data to examine how a round cap installed at the ground level impacts the bearing capacity of a single pile.

This research based on the methodology developed by the authors demonstrates that a laterally loaded pile, supported by a rigid cap at the ground level, is exposed to increased resistance due to the following factors, including the passive pressure along the cap side that creates an unloading effect for a horizontally-loaded pile. The cap acts as a vertical soil rebuff creating an additional resistance moment; the horizontal shear of the cap causes supplementary lateral resistance of a pile.

The following initial geometric and elastic material properties of the single pile are applied: total length $L = 5.0$ meters (3.0 m above and 2.0 m below the ground surface); pile diameter $d = 40$ centimeters; circle plates of various diameters $D = 60; 70; 80$ and 100 cm and their thickness $t = 20$ cm. A lateral load is applied at various heights, H , of 0.2; 1.0; 2.0 and 3.0 meters above the ground level.

Elastic properties of the soil are assumed to be constant at each point below the surface of the ground, they are listed below: bulk modulus of soil $E_s=20$ MPa; Poisson's ratio $\mu=0,37$; unit Weight $\gamma=18,5$ kN/m³; cohesion $c=0,05$ MPa; angle of internal friction $\varphi=20^\circ$.

The data has proven that cap-covered piles are substantially more economical (over 40 %) in terms of materials consumption rate if compared to constant cross-section piles (cap-free or broadening piles), all other factors being equal.

Key words: single pile footing, lateral load, rigid round cap, bearing capacity.

References

1. *Normy proektirovaniya kontaktnoy seti* [Overhead Contact System Design Standards]. 141-99. MPS RF. Moscow, 2001.
2. Matus N.Yu. *K raschetu gorizonta'no nagruzhennoy svai-kolonny s nizkim rostverkom-ogolovkom* [About the Design of a Laterally Loaded Pile-Column with Deep Grid Pile Foundation]. OOO HT Project — Ukraina, Odessa, 8 p.
3. Buslov A.S., Tulakov E.S. *Raschet gorizonta'no nagruzhennykh odnostoechnykh opor po ustoychivosti* [Stability Design of Laterally Loaded Single Footings]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Beddings, Foundations, and Soil Mechanics]. Moscow, 2004, no. 3, pp. 6—9.

About the authors: **Buslov Anatoliy Semenovich, Moscow State Open University named after V.S. Chernomyrdin**, 22 Pavla Karchagina St., Moscow, 129626, Russian Federation; a.buslov@yandex.ru; 8 (495) 316-39-64;

Bakulina Aleksandra Aleksandrovna, Ryazan' Branch, Moscow State Open University named after V.S. Chernomyrdin; 26/53 Pravo-Lybedskaya St., 390000, Ryazan', Russian Federation; alexandrakulina@yandex.ru.

For citation: Buslov A.S., Bakulina A.A. *Vliyaniye kol'tsevogo ushireniya na nesushchuyu sposobnost' gorizonta'no nagruzhennoy monosvaynoy opory* [Effect of a Round Cap on the Bearing Capacity of a Laterally Loaded State Pile]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2012, no. 4, pp. 63—68.