

УДК 55.144:624.131.522.34

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СВАЙНОГО ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМЕНТА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТОВОГО ПРОВАЛА

Представлены результаты исследований работы свайного ленточного фундамента при образовании карстового провала. Получены закономерности изменения условий работы свай вокруг карстового провала и разработаны аналитические решения для определения коэффициента жесткости свай и максимальных нагрузок, передаваемых на сваи.



**ГОТМАН
НАТАЛЬЯ ЗАЛМАНОВНА**

Доктор технических наук, профессор кафедры "Строительное производство и геотехника" ФГБОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет", главный специалист экспертно-аналитического отдела НИИОСП им. Н.М. Герсманова (Москва, Россия).

Основные направления деятельности:

- экспериментально-теоретические исследования и разработка методов расчета фундаментов в слабых грунтах и на закарстованных территориях, проектирование зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях. Автор 103 опубликованных работ.



**ДАВЛЕТЯРОВ
ДИНАР АНФИСОВИЧ**

Кандидат технических наук, главный конструктор ООО "Подземпроект", член РОМГГиФ (Москва, Россия).

- исследование работы оснований и фундаментов на закарстованных территориях. Автор 12 опубликованных работ.

Введение

При проектировании зданий и сооружений на закарстованных территориях конструктивная защита зданий преимущественно выполняется в фундаментной части. Фундаменты, обеспечивающие защиту зданий против карстовых деформаций, получили название "карстозащитные фундаменты". Наиболее распространенным типом карстозащитного фундамента является свайный ленточный фундамент.

Расчет свайного ленточного фундамента при образовании карстового провала, как правило, выполняют путем математического моделирования фундамента на неравномерно деформируемом основании. При моделировании процессов совместного деформирования основания и фундамента исходные данные о прочностных и деформационных характеристиках грунтов являются приближенными. Поэтому целесообразно применять упрощенные расчетные модели. Такой моделью основания свайного ленточного фундамента в условиях образования карстового провала является контактная модель, в соответствии с которой сваи моделируются связями конечной жесткости, определяемыми по аналогии с коэффициентом жесткости свай.

На основании исследований [1] установлено, что условия работы свай у границ провала отличны от таковых в свайном фундаменте, когда карстовый провал не образуется, что влияет на коэффициент жесткости свай.

Для разработки метода определения коэффициента жесткости свай, учитывающего указанное изменение условий работы, выполнены экспериментально-теоретические исследования взаимодействия "свайный ленточный фундамент – основание". В результате получены закономерности изменения условий работы свай вокруг карстового провала, на основе которых разработаны аналитические решения для определения коэффициента жесткости свай.

Исследование закономерностей изменения условий работы свай вокруг карстового провала

Для выявления закономерностей изменения условий работы свай выполнена серия численных расчетов работы свай ленточного свайного фундамента вокруг карстового провала при нагружении их осевой силой. Карстовый провал моделировался воронкой ступенчатой формы (рис. 1).

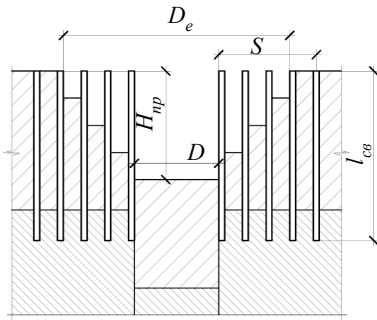


Рис. 1. Расчетная схема основания свайного фундамента при образовании карстового провала

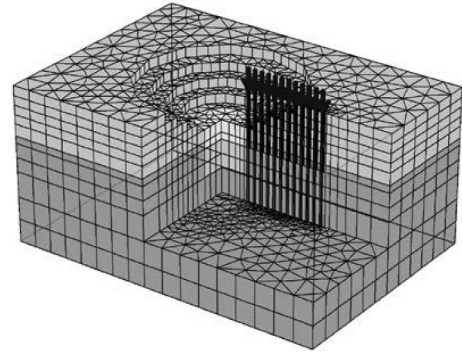


Рис. 2. Схема расчетной модели в программе "PLAXIS 3D Foundation"

Расчеты выполнены с использованием программного комплекса "PLAXIS 3D Foundation". Расчетная модель представляет собой массив грунта с погруженными в него сваями, разбитый на конечные элементы. Для расчетов использована упругопластическая модель грунта с упрочнением (Hardening Soil model). Сваи моделировались объемными элементами, а взаимодействие сваи с грунтом – с помощью контактных элементов вокруг сваи (интерфейсов) (рис. 2).

Расчеты фундамента выполнялись без учета и с учетом образования карстового провала. По результатам расчетов строились графики "нагрузка – осадка" в зависимости от изменения длины и шага свай, глубины провала, характеристик грунтов основания и удаленности сваи от карстового провала. По графикам "нагрузка-осадка" определялся коэффициент жесткости свай как отношение нагрузки на сваю к осадке при этой нагрузке на границе "условно линейного" участка графика. Так как изменение формы кривой "нагрузка – осадка" отражает изменение условий работы свай вокруг провала, в качестве количественной характеристики этого изменения принят коэффициент $\alpha = K/K_1$, где K и K_1 – коэффициенты жесткости до и после образования провала.

Основными изменяемыми параметрами в численном эксперименте являются: отношение длины сваи (l_{sv}) к глубине карстового провала (H_{np}), расстояние от границы провала до сваи (S) и характеристики грунтового основания.

Расчеты выполнялись для 40 вариантов исходных данных при варьировании l_{sv} в диапазоне 6...16 м, S – 0,5...8 м, H_{np} – 6...10 м. Грунтовое основание принято 2-х типов: 1 – двухслойное основание, сложенное суглинками мягкопластичными (с поверхности) и глинами полутвердыми (под нижним концом сваи); 2 – двухслойное основание, сложенное суглинками мягкопластичными (с поверхности) и гравийным грунтом (под нижним концом сваи).

На рис. 3 представлены графики "нагрузка – осадка" для первого типа грунтового основания при $l_{sv}/H_{np} = 0,553$ и $1,515$ на расстоянии сваи от границы провала соответственно $S = 0,5$ и $3,5$ м. В табл. 1 приведены результаты расчета коэффициента α в зависимости от l_{sv}/H_{np} и S/H_{np} , а на рис. 4,а их графическая интерпретация. Аппроксимация кривых (см. рис. 4,а) позволила получить

$$\alpha = 1 + \frac{m}{(l_{sv}/H_{np})^2}, \quad (1)$$

где m определяется в зависимости от S/H_{np} (см. рис. 4,б)

$$m = \frac{0,041}{(S/H_{np})^2 + 0,04}. \quad (2)$$

Путем подстановки m из (2) в (1) и математических преобразований определим коэффициент α , снижающий коэффициент жесткости сваи до образования провала

$$\alpha = 1 + \frac{0,041H_{np}^4}{l_{sv}^2(S^2 + 0,04H_{np}^2)}. \quad (3)$$

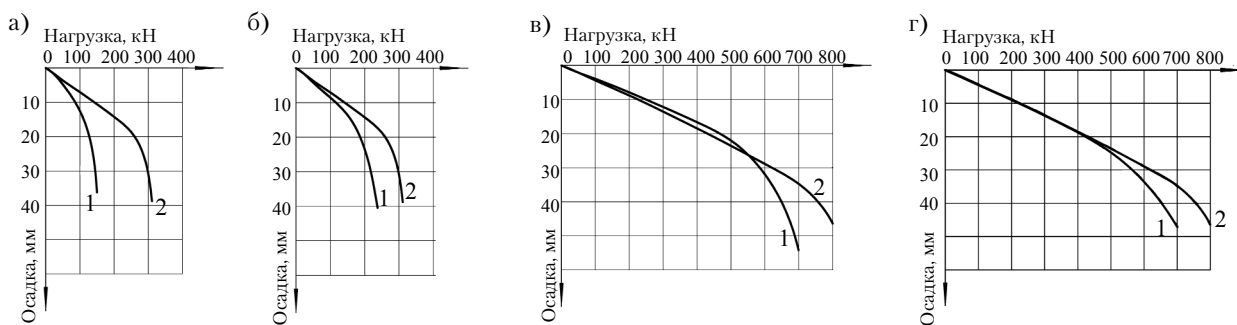


Рис. 3. Зависимость нагрузка-осадка для первого типа грунтового основания:

а - $l_{св}/H_{np} = 0,553$; $S = 0,5$ м; б - $l_{св}/H_{np} = 0,553$; $S = 3,5$ м; в - $l_{св}/H_{np} = 1,515$; $S = 0,5$ м; г - $l_{св}/H_{np} = 1,515$; $S = 3,5$ м; 1 - с учетом провала; 2 - без учета

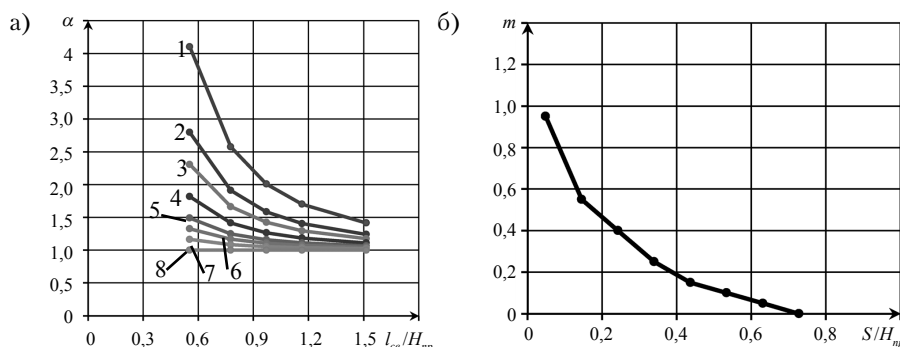


Рис. 4. Графики зависимостей: α от $l_{св}/H_{np}$ (а) и m от S/H_{np} (б):

$S/H_{np} = 0,049$ (1); $0,146$ (2); $0,243$ (3); $0,340$ (4); $0,437$ (5); $0,534$ (6); $0,631$ (7); $0,728$ (8)

Таблица 1

$l_{св}/H_{np}$	Коэффициент α при S/H_{np} равном							
	0,049	0,146	0,243	0,340	0,437	0,534	0,631	0,728
0,553	4,103	2,487	2,205	1,590	1,385	1,128	1,077	1
0,777	2,583	1,917	1,792	1,542	1,458	1,250	1,167	1
0,971	2,000	1,824	1,735	1,412	1,294	1,059	1,059	1
1,165	1,500	1,417	1,417	1,292	1,250	1,125	1,042	1
1,515	1,125	1,125	1,125	1,125	1,125	1,063	1,063	1

Для учета грунтовых условий в (3) введен коэффициент β , который определен путем сравнения расчетного α с α для условий, заданных в численных исследованиях (см. рис. 3)

$$\alpha = 1 + \beta \frac{0,041H_{np}^4}{l_{св}^2(S^2 + 0,04H_{np}^2)}. \quad (4)$$

После серии расчетов были определены β в песчаных и глинистых грунтах (табл. 2) с различными физико-механическими характеристиками.

Результаты определения α по (4) были сопоставлены с данными испытаний фрагментов свайных фундаментов в полевых условиях.

В качестве модельных были использованы железобетонные сваи размером $150 \times 150 \times 3000$ мм. Грунтовые условия на площадке испытаний представлены суглинками полутвердой консистенции. Имитация провала осуществлялась устройством выемки. Испытания фундаментов состояли из двух последовательных статических испытаний вертикальной нагрузкой, одно из которых проводилось до образования выемки и второе – после ее устройства. По данным натурного эксперимента строились графики "нагрузка – осадка" свай и определялось снижение коэффициентов жесткости свай ($\alpha = K/K_1$) при образовании провала в зависимости от удаленности сваи от него. На рис. 5 представлены графики изменения α в зависимости от S . Оба графика показывают удовлетворительную сходимость расчетных и опытных данных.

В результате, коэффициент жесткости свай (K_1) вокруг провала предложено снижать по сравнению с коэффициентом жесткости, определенным для нормальных условий эксплуатации, т.е. когда провал под подошвой фундамента не образуется (K), и определять K_1 в зависимости от $l_{св}$, H_{np} , S , а также характеристик грунтов покровной толщи

$$K_1 = K / \left(1 + \beta \frac{0,041H_{np}^4}{l_{св}^2(S^2 + 0,04H_{np}^2)} \right). \quad (5)$$

Таблица 2

Пески		Коэффициент β при коэффициенте пористости e равном						
		0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Гравелистые и крупные		0,25	0,39	0,54	–	–	–	–
Средней крупности		0,27	0,42	0,56	–	–	–	–
Мелкие		0,27	0,53	0,79	1,05	–	–	–
Пылеватые		0,35	0,69	1,03	1,37	–	–	–
Супеси	$0 \leq I_L \leq 0,25$	0,73	0,96	1,21	1,46	–	–	–
	$0,25 < I_L \leq 0,75$	0,77	0,98	1,18	1,47	1,84	–	–
Суглинки	$0 \leq I_L \leq 0,25$	0,56	0,79	0,91	1,08	1,21	1,44	–
	$0,25 < I_L \leq 0,5$	0,68	0,84	1,00	1,21	1,46	1,69	–
	$0,5 < I_L \leq 0,75$	–	–	1,11	1,37	1,64	1,85	2,06
Глины	$0 \leq I_L \leq 0,25$	–	0,71	0,83	0,93	1,04	1,19	1,34
	$0,25 < I_L \leq 0,5$	–	–	0,88	1,00	1,17	1,36	1,61
	$0,5 < I_L \leq 0,75$	–	–	1,05	1,19	1,40	1,60	1,78

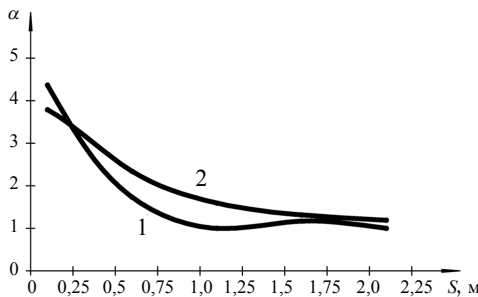


Рис. 5. Изменение коэффициента α в зависимости от S :
1 - по результатам натурального эксперимента; 2 - по результатам расчета по (4)

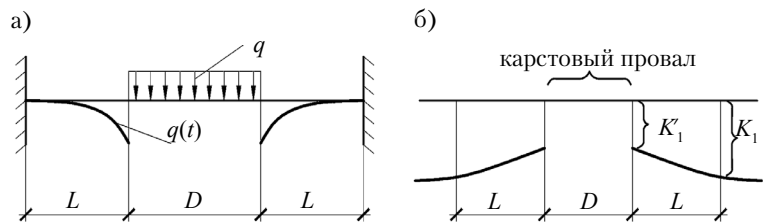


Рис. 6. Схема распределения нагрузок на основание (а) и коэффициента жесткости свай (б) над карстовым провалом

Определение максимальных нагрузок на сваи с учетом образования карстового провала

При образовании карстового провала под ростверком ленточного свайного фундамента нагрузка от вышележащих конструкций перераспределяется на сваи вокруг провала в соответствии со схемой на рис. 6, а, а коэффициент жесткости свай снижается в соответствии со схемой на рис. 6, б. Дополнительная распределенная нагрузка, передаваемая на сваи вокруг провала (q_t), распределяется на сваи на расстоянии L . Длина этого участка зависит от жесткости ростверка, диаметра карстового провала и коэффициента жесткости свай и может быть определена по [2]:

$$L^3 = \frac{36B(t)}{DK(t)}, \tag{6}$$

где $B(t)$ – жесткость ростверка; $K(t)$ – коэффициент жесткости свай на краю карстового провала.

Для ленточного свайного фундамента с ростверком прямоугольного сечения высотой h

$$L = \sqrt[3]{\frac{3E_6 abh^3}{K_1^1 D}}, \tag{7}$$

где K_1^1 – минимальный коэффициент жесткости свай вокруг карстового провала (см. рис. 6, б); E_6 – модуль деформации бетона ростверка; b – ширина ростверка; a – шаг свай.

Дополнительная нагрузка на ростверк на участке длиной L вокруг провала распределяется по треугольной эпюре (см. рис. 6, а), уменьшаясь от максимальной у границ карстового провала до нуля на границе рассматриваемого участка. Коэффициент жесткости K_1^1 у границы провала определим по (5) при $S = 0$ и $H_{np}^2 / l_{cs}^2 = \gamma$

$$K_1^1 = K / (1 + \beta\gamma). \tag{8}$$

Дополнительная нагрузка

$$\Delta N = (3qD_a)/(2L) . \quad (9)$$

Рассмотрев совместно (7), (8) и (9), получим формулу для определения максимальной дополнительной нагрузки на сваю при образовании карстового провала в зависимости от D , H_{np} , $l_{св}$, распределенной нагрузки над провалом, размеров ростверка b и h , шага свай и коэффициента жесткости свай K

$$\Delta N = \frac{3qD_a}{2h} \sqrt[3]{\frac{KD}{3E_{\sigma}ab(1+\beta\gamma)}} . \quad (10)$$

Максимальные нагрузки на сваи с учетом образования карстового провала

$$P_{\max} = P + \Delta N , \quad (11)$$

где P – нагрузка на сваю, определенная расчетом для условий нормальной эксплуатации, т.е. без учета образования карстового провала.

Использование предложенных аналитических зависимостей позволило без выполнения трудоемких расчетов при образовании карстового провала оценить максимальные нагрузки, передаваемые на сваи вокруг провала, и определить предварительно шаг и длину свай ленточного фундамента, что наиболее ценно при вариантном проектировании.

Аналитические решения для K и P_{\max} при образовании карстового провала были использованы при проектировании свайных фундаментов торгового центра в г. Уфе. Учет снижения коэффициента жесткости свай у границ провала позволил уменьшить максимальные нагрузки, передаваемые на сваи вокруг провала, и на 30% сократить число свай по сравнению с традиционными расчетами.

Выводы

1. В результате исследований получены закономерности изменения условий работы свай вокруг карстового провала, на основе которых разработаны аналитические решения для определения коэффициента жесткости свай в зависимости от длины сваи, глубины провала, расстояния от сваи до границы провала, а также характеристик грунтов покровной толщи.

2. Предложен аналитический метод определения максимальных нагрузок на сваи вокруг карстового провала, что позволяет избежать выполнения трудоемких расчетов при определении предварительно шага и длины свай ленточного фундамента, что наиболее ценно при вариантном проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Готман Н.З. Расчет противокарстовых фундаментов зданий и сооружений // "ОФМГ". - 2008. - № 1.- С. 20-24.
- 2 Метелюк И.С. Инженерный метод расчета фундаментов жилых бескаркасных зданий на воздействие карстового провала // Строительные конструкции. - Киев, 1989. - № 42. - С. 6-11.

.....

