

Я.И. Домбровский, с.н.с.

Научно-исследовательский институт строительных конструкций, г. Киев

НАЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЖЕСТКОСТИ ГРУНТА ПРИ РАСЧЕТАХ КОМБИНИРОВАННЫХ СВАЙНО-ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Приведены основные проблемы, которые возникают при проектировании зданий и сооружений на свайных фундаментах во время действия горизонтальных нагрузок, принципы метода расчетов свайных фундаментов сооружений при учете жесткости грунтового основания. Метод переменных коэффициентов жесткости основания позволяет при расчетах учитывать усилия, которые возникают в свайных фундаментах, а также выполнять расчеты системы «сооружение – основание», учитывая особенности деформирования грунтов.

Ключевые слова: коэффициент жесткости основания, деформируемость грунта, система «сооружение – основание».

Я.І. Домбровський, с.н.с.

Науково-дослідницький інститут будівельних конструкцій, м. Київ

ПРИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ЖОРСТКОСТІ ГРУНТУ ПРИ РОЗРАХУНКАХ КОМБІНОВАНИХ ПАЛЬОВО-ПЛИТНИХ ФУНДАМЕНТІВ НА ДИНАМІЧНІ ВПЛИВИ

Наведено основні проблеми, які виникають при проектуванні будинків і споруд на пальових фундаментах під час дії горизонтальних навантажень, принципи методу розрахунків пальових фундаментів споруд при обліку жорсткості ґрунтової основи. Метод змінних коефіцієнтів жорсткості основи дозволяє при розрахунках урахувати зусилля, які виникають у пальових фундаментах, а також виконувати розрахунки системи «споруда – основа», враховуючи особливості деформування ґрунтів.

Ключові слова: коефіцієнт жорсткості основи, деформації ґрунтів, система «споруда – основа».

Ya.I. Dombrowski, Senior Research Fellow

Scientific-Research Institute of Building Constructions, Kiev

APPOINTMENT FACTORS OF STIFFNESS OF SOIL IN CALCULATIONS COMBINING PILE- PLATE FOUNDATIONS FOR DYNAMIC EFFECTS

The main problems that arise in the design of buildings and structures on pile foundations during the action horizontal loads, the principles of calculation method of pile foundations structures when accounting for the hardness of the soil Foundation. Method of variable stiffness base allows the calculations take into account the efforts that arise in the pile foundations, and also allows you to perform calculations of «structure – base», taking into account the peculiarities of deformation of soils.

Keywords: coefficient for the Foundation, deformation of the soil, the system «building – base».

Введение. Сейчас доля свайных фундаментов в гражданском и промышленном строительстве достигает по разным оценкам 25%. При строительстве высотных зданий и в сейсмически опасных зонах объем

свайных фундаментов достигает 70%. Часто применяемым при проектировании высотных зданий на сейсмических территориях является комбинированный свайно-плитный (КСП) тип фундамента. К зданиям и сооружениям в сейсмических зонах предъявляются повышенные требования по прочности конструктивных элементов.

На сегодняшний день отсутствует методика моделирования совместной работы грунтов и свайных фундаментов при сейсмических воздействиях. Существующие методики не позволяют определить и задать в расчетных схемах такие параметры, как жесткость грунта вокруг свай в горизонтальном и вертикальном направлениях. Жесткость грунта в межсвайном пространстве для кустов свай не является величиной постоянной. Жесткости грунта вокруг свай крайних и внутренних рядов, по данным исследований, различается значительно. При прохождении сейсмических волн жесткостные свойства массива «грунт – сваи» изменяются.

Существуют два основных метода расчета зданий на сейсмические воздействия:

1. Спектральный метод, недостатком которого является представление о работе грунта основания как жесткого тела, на котором размещается сооружение, то есть при расчетах игнорируется податливость фундаментов в грунтах основания.

2. Прямой динамический метод. При расчете зданий с помощью этого метода используются расчетные акселерограммы, которые представляют собой инструментальные записи ускорений грунта при сейсмических воздействиях. При этом возможны искажения в акселерограммах во время их записи и оцифровке. На этапе моделирования грунта основания при этом методе возникают проблемы, связанные с размерами грунтового массива под зданием, заданием граничных условий, продолжительностью расчета и т.д.

Применение спектрального метода при расчетах высотных зданий с комбинированными свайно-плитными фундаментами на сейсмические воздействия требует решения задачи определения жесткости фундаментной части при формировании расчетной схемы здания.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Основой для современных методов расчета свайных фундаментов при действии вертикальной и горизонтальной нагрузок послужили работы таких специалистов в области механики грунтов, как М.Ю. Абелев, В.Г. Березанцев, С.С. Вялов, А.Л. Гольдин, М.Н. Гольдштейн, М.И. Горбунов-Посадов, Б.И. Далматов, Ю.К. Зарецкий, Н.А. Цытович и многие другие.

В сейсмически опасных районах работа группы свай на горизонтальную и вертикальную нагрузки приобретает особое значение. В таблице 1 приведены некоторые результаты исследований работы группы свай на действие горизонтальных нагрузок, которые свидетельствуют о значительно большем сопротивлении горизонтальным нагрузкам группы свай по отношению к сопротивлению одиночной сваи.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований сопротивления горизонтальным нагрузкам группы свай

Авторы экспериментов	К-во свай в группе	Сечение свай, см	Длина свай, м	Расстояние между сваями	Ростверк	Грунтовые условия	Коэф. $K_{ке}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Голубков В.Н.	15	Ø28	6,00	3d	низкий	мелкий илистый песок	1,92
	15	Ø28	6,00	3d	низкий		1,90
	9	Ø28	5,98	3d	низкий		2,05
	9	Ø28	6,00	3d	низкий		1,50
Быков В.И.	4	30x30	5,50	3d	низкий	глинистые грунты твердой и полутвердой консистенции	1,80
	4	30x30	4,00	3d			низкий
Денисов О.Л.	4	30x30	5,35	4d	низкий	глинистые грунты твердой консистенции	1,31
	5	30x30	5,50	4d			низкий
Бабенко В.А.	4	30x30	5,40	3d	высокий	лессовые грунты	1,50...1,80

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Кустовой эффект, который приводит к более рациональному количеству свай и месту их расположения, исследован на недостаточном уровне и носит фрагментарный характер.

Цель работы – получение методики определения коэффициентов жесткости основания свай в горизонтальном и вертикальном направлениях и распределение жесткостей по сваям в направлении действия сейсмической нагрузки, совершенствование совместных расчетов системы «сооружение – фундамент – основание». В статье приведены отдельные результаты моделирования работы свайных фундаментов.

Основной материал и результаты. Энергия любых динамических воздействий переносится от их источников волнами напряжений разного типа. По мере распространения волны часть ее энергии теряется, что приводит к снижению интенсивности динамической нагрузки с удалением от ее источника и называется затуханием. Причины затухания различны и связаны главным образом с неидеальной упругостью, дискретностью и неоднородностью строения любого массива грунтов как среды распространения упругих волн. В соответствии с различными механизмами потерь энергии волны, можно выделить следующие виды затухания:

- 1 – расхождение (геометрическое затухание);
- 2 – рассеяние на различных неоднородностях среды;
- 3 – поглощение (или гистерезисное затухание).

В реальном грунте все три вида затухания проявляются одновременно, но в зависимости от состава и свойств самого грунта, а

также типа и особенно частоты волны соотношение между ними может существенно варьироваться.

В практике современного строительства для снижения амплитуд колебаний основания массивных сооружений принимают КСП с заглублением нижних концов свай в более плотные грунты. Увеличение глубины заложения фундаментов приводит к снижению амплитуд вибрации в связи с увеличением жесткости основания, в основном за счет роста природного давления грунта. Это приводит также к дополнительному демпфированию за счет трения и сцепления грунта по поверхности контакта свай и плиты с грунтом.

Работа фундаментов при наличии динамических нагрузок характеризуется такими факторами:

1. Параметры динамической нагрузки и схема ее передачи на сооружение (обусловленная фильтрующими свойствами грунтов по отношению к колебаниям разной частоты).

2. Свойства грунтов основания (возможность снижения несущей способности грунта, а также его демпфирующие и фильтрующие свойства).

Давление грунта в горизонтальном направлении зависит от взаимного перемещения его и конструкции в грунте. Классическая систематизация горизонтального давления грунта на удерживающие сооружения рассматривает три состояния: активное давление грунта σ_a , которое реализуется при перемещении конструкции в направлении перемещения грунта; пассивное давление грунта σ_p , которое реализуется при перемещении конструкции против перемещения грунта; давление покоя σ_0 , которое реализуется при отсутствии перемещений конструкции и грунта. На рисунке 1 представлен график изменения горизонтального давления грунта на конструкцию в зависимости от разницы взаимного перемещения грунта и конструкции u .

Работа одиночной сваи в грунте при действии горизонтальной нагрузки изучена вполне достаточно; это позволило разработать довольно надежные и проверенные на практике методы расчета. Намного меньше изучена работа группы свай при действии горизонтальной нагрузки.

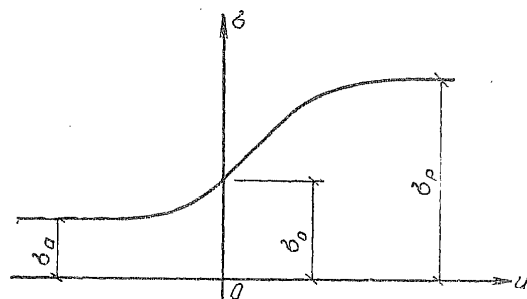


Рис. 1. Горизонтальное давление грунта на конструкцию σ в зависимости от разницы взаимного перемещения грунта и конструкции u

Практика показывает, что поведение одной сваи в группе свай с жестким защемлением ее оголовка в ростверк значительно отличается от

поведения одиночной сваи. Это отличие выражают через кустовой эффект, который определяется как

$$K_{ке} = P_{гг} / nP_{го}, \quad (1)$$

где $P_{гг}$ – сопротивление горизонтальной нагрузке группы свай, которое отвечает определенному горизонтальному перемещению ростверка; $P_{го}$ – сопротивление горизонтальной нагрузке одиночной сваи при том же горизонтальном перемещении; n – количество свай в группе.

Имеющийся материал свидетельствует о значительно большем сопротивлении горизонтальным нагрузкам группы свай по отношению к сопротивлению одиночной сваи. При этом происходит уменьшение перемещения оголовка сваи в три и более раз.

Численные исследования сопротивления групп свай горизонтальной нагрузке показали, что жесткое защемление в ростверк повышает их сопротивление горизонтальной нагрузке, при этом взаимное влияние свай приводит к некоторому снижению этого сопротивления.

Результаты лабораторных исследований сопротивления группы свай горизонтальным нагрузкам свидетельствуют о том, что сопротивление горизонтальным нагрузкам группы свай возрастает с увеличением их количества в фундаменте, а интенсивность роста сопротивления значительно зависит от расстояний между сваями. Так при расстоянии между сваями $3d$ увеличение количества свай с двух до четырех приводит к росту сопротивления в 1,6 раза, при увеличении количества свай с двух до шести – в 2,2 раза. Необходимо отметить, что горизонтальная нагрузка группы свай приводит к возникновению различных усилий в сваях разных рядов (рис. 2). Наибольшая реакция воспринимается сваями первого ряда.

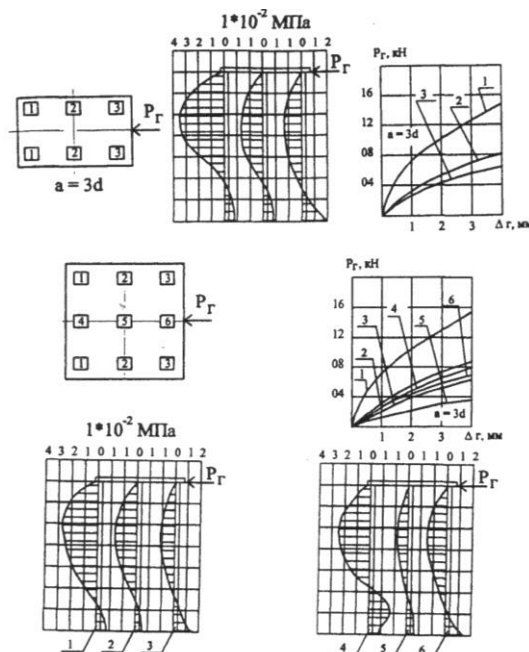


Рис. 2. Эпюры контактных давлений и распределение нагрузок между сваями в кусте с шести и девяти свай

Существенным фактором, который влияет на сопротивление группы свай горизонтальной нагрузке, есть вертикальное давление в грунте. Исследования поведения группы свай свидетельствуют об увеличении сопротивления горизонтальной нагрузке группы свай во время совместного действия горизонтальной и вертикальной нагрузок. Эффект увеличения сопротивления куста свай горизонтальным нагрузкам при увеличении вертикальной нагрузки объясняется развитием и увеличением сил трения и сцепления по боковой поверхности свай и под пятой сваи.

В НИИСКе разработана методика, которая позволяет моделировать систему «сооружение – фундамент – основание» при действии горизонтальных и вертикальных нагрузок. Особенностью данной методики является возможность ее применения для определения усилий в конструкциях здания по спектральному методу. В расчетной схеме основание моделируется коэффициентами жесткости. Жесткости задаются в двух направлениях по горизонтали (по длине сваи), а по вертикали – под пятой сваи. При моделировании свай в ПК «ЛИРА» используются два вида конечных элементов:

1. Двухузловые стержневые конечные элементы с шестью степенями свободы в узлах для моделирования свай (конечный элемент КЭ № 10).

2. Одноузловые конечные элементы, задающие связь конечной жесткости для моделирования грунтового основания, в которое заводятся сваи (КЭ № 51).

Моделирование свай происходит в такой последовательности:

1. Свая разбивается на двухузловые стержни длиной 1,0 м (КЭ № 10).

2. Задаются характеристики сваи (модуль упругости, размеры сечения).

3. В каждом узле сваи задается КЭ № 51. При этом сначала моделируется жесткость грунта в направлении оси X, затем моделируется жесткость по оси Y. Сопротивление грунта свае по оси Z моделируется КЭ № 51, заданным в нижнем ее узле. Модель сваи приведена на рисунке 3.

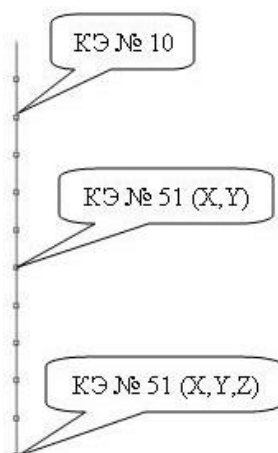


Рис. 3. Модель сваи

Начальные расчетные значения коэффициентов жесткости $K_{x,y}$ грунта на боковой поверхности свай в горизонтальном направлении с учетом сейсмических воздействий определяются с учетом методики норм [1] по формулам:

$$K_{x,y} = C_{x,red} A_{x,i}, C_{x,red} = 0,7 K_{z,yz}, K_{z,yz} = \frac{K_{z,red}}{A_p};$$

$$\bar{\beta} = \sqrt{\frac{C_{p,m} u}{E_b A_p}}; \alpha = \frac{C_z^*}{E_b}; C_{p,m} = \frac{\sum_{k=1}^{k_0} C_{p,k} l_k}{l}; K_{z,red} = N E_b A_p \bar{\beta} \frac{\bar{\beta} th(\bar{\beta} l) + \alpha}{\bar{\beta} + \alpha th(\bar{\beta} l)},$$

где $A_{x,i}$ – грузовая площадь, м²; A_p – площадь поперечного сечения свай, м²; u – периметр поперечного сечения свай, м; E_b – модуль упругости материала свай, кПа; C_z^* – коэффициент упругого равномерного сжатия грунта, кН/м³, $C_{p,k}$ – удельное упругое сопротивление грунта на боковой поверхности свай в k -м слое, принимаемое по табл. 6 и 7 [1]; l_k – толщина k -го слоя грунта, м; l – глубина погружения свай в грунт, м; b_0 – коэффициент, м⁻¹, принимаемый равным для песчаных грунтов 1, для супесей и суглинков 1,2, для глин и крупнообломочных грунтов 1,5; E – модуль деформации грунта под подошвой фундамента, кПа, определяемый в соответствии с требованиями [1]; $A_{10} = 10$ м²; A – площадь условного фундамента одной свай, м²; th – тангенс гиперболический.

Поскольку работа наружных и внутренних рядов свай значительно различается в рассматриваемой методике расчета комбинированного свайно-плитного фундамента, введено понятие трех жесткостных объемов грунта основания:

- 1) наружный объем – грунт вокруг контурных свай фундамента;
- 2) объем грунта в переходной зоне – грунт между сваями по внешнему контуру и сваями второго или третьего рядов (в зависимости от длины и шага свай);
- 3) внутренняя зона – грунт под центральной частью фундамента.

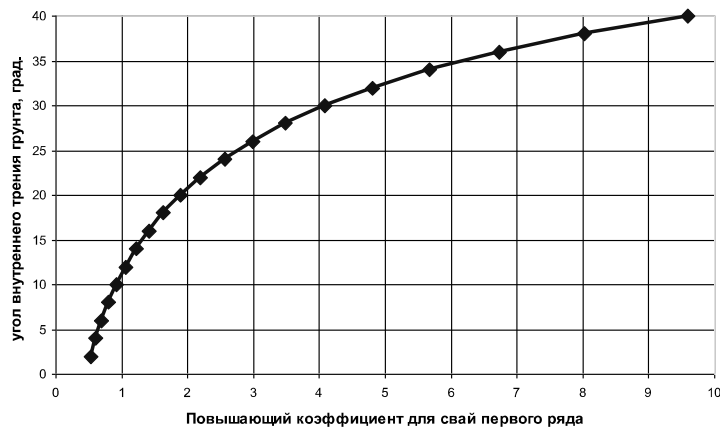


Рис. 4. Зависимость «повышающий коэффициент – угол внутреннего трения грунта» (песчаный грунт, неводонасыщенный)

Для первого жесткостного объема грунта при определении коэффициентов жесткости $K_{x,y}$ применяется повышающий коэффициент,

который зависит от средневзвешенного угла внутреннего трения грунта, определяемый по графику, приведенному на рисунке 4.

Для подтверждения возможности применения данной методики были выполнены работы по численному моделированию ряда существующих объектов и определены фактические динамические параметры (преобладающие периоды и частоты при колебаниях по основным формам, формы колебаний, логарифмический декремент затухания) зданий и фундаментов при их микросейсмических колебаниях.

Результаты этих исследований позволили сделать вывод о приемлемости данной методики при оценке усилий, возникающих в зданиях при действии горизонтальных нагрузок.

На рисунках 5 и 6 приведены расчетная схема здания и усилия, возникающие в сваях при сейсмических воздействиях, определенных с помощью спектрального метода. Результаты моделирования здания с учетом грунта вокруг свай позволяют условно выделить под зданием три характерные зоны: 1 – зона с наименьшими усилиями в сваях; 2 – зона средних усилий; 3 – зона максимальных усилий.

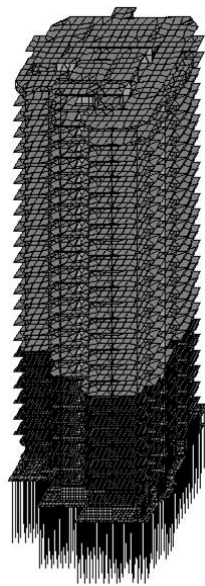


Рис. 5. Расчетная схема здания

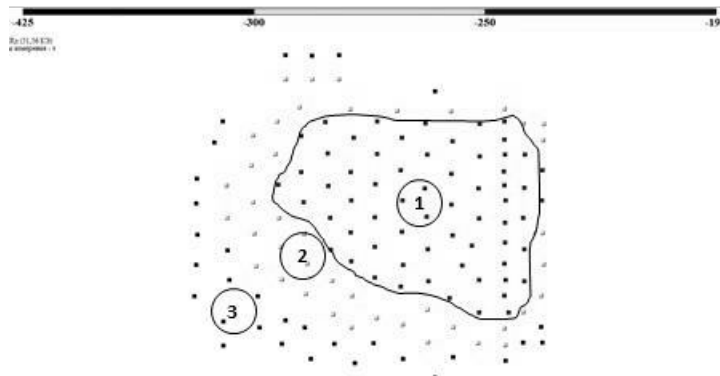


Рис. 6. Усилия в сваях

На основании выполненных расчетов можно сделать следующие **ВЫВОДЫ**:

1. Жесткость грунта в горизонтальном направлении зависит от взаимного перемещения грунта и свай в горизонтальном направлении.

2. При проектировании КСП фундамента следует рассматривать три жесткостных объема грунта основания.

3. При определении коэффициентов жесткости основания в горизонтальном направлении для свай контурного ряда и свай переходной зоны следует вводить повышающие коэффициенты.

Литература

1. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. – М., 1988.
2. Вознесенский, Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках / Е.А. Вознесенский. – М.: Изд-во Московского университета, 1997. – 286 с.
3. Знаменский, В.В. Инженерный метод расчета горизонтально нагруженных групп свай / В.В. Знаменский. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 127 с.
4. Знаменский, В.В. Расчет горизонтально нагруженных групп свай / В.В. Знаменский, А.В. Конов // Труды XI Международного конгресса по механике грунтов и фундаментостроению. – Сан-Франциско, 1985. – С. 1511 – 1514.
5. Завриев, К.С. К расчету свай и свай-оболочек на горизонтальные и моментные нагрузки / К.С. Завриев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1974. – № 12. – С. 10 – 11.
6. Клейн, Г.К. Расчет железобетонных свай на действие вертикальных и горизонтальных нагрузок / Г.К. Клейн, В.Н. Караваев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1979. – № 6. – С. 13 – 15.
7. Уздин, А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений / А.М. Уздин. – С-П., 1993. – 174 с.
8. Broms-Bent B. Lateral resistance of piles in cohesionless soils / B. Broms-Bent // Journal of the Soils Mechanics and Foundation Div. – Vol. 90. – № 3.
9. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. – М., 1986.
10. ДБН В.1.1-12:2006. Строительство в сейсмических районах Украины. – К., 2006.

Надійшла до редакції 17.10.2013

©Я.І. Домбровський