

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГЛУБЛЕНИЯ РОСТВЕРКА ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА

А.О. КОЛЕСНИКОВ, канд. техн. наук

В.Н. ПОПОВ, д-р физ.-мат. наук

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН*

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1. E-mail: popov@itam.nsc.ru

Проведены эксперименты по оценке динамического поведения свайных фундаментов с учетом взаимодействия ростверка с грунтом. Получены данные влияния на амплитуды колебаний заглубления ростверка, количества свай в фундаменте, структуры грунта, ориентации свайного куста по отношению к направлению колебаний. Определено, что заглублением ростверка можно добиться существенного снижения амплитуд колебаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: динамика, свайный фундамент, заглубленный ростверк

В настоящее время, в качестве опорных конструкций под машины с динамическими нагрузками, применяются свайные фундаменты, имеющие заглубленный ростверк. При оценке амплитуды и частоты колебаний таких фундаментов по современным методикам заглубление ростверка не учитывается [1], хотя очевидно, что взаимодействие с грунтом по боковой поверхности возникающее при этом, может существенно влиять на эти параметры.

В оценке влияния заглубления фундаментов в настоящее время не существует единого подхода. Одной из первых успешных попыток решить эту задачу явилась работа М.И. Забылина [2], в которой при использовании волновой модели учитывалась реакция грунта на боковой поверхности фундамента. Дальнейшие исследования этой проблемы в постановке аналогичной [2] были предприняты в работах [3-5], в которых учитывалось заглубление ростверка при прогнозировании его колебаний, а также описана методика вычисления динамических параметров [5]. Экспериментальные исследования данного вопроса проводились А.Д. Кондиным [6] и М. Новаком [7]. Ими были получены результаты, подтверждающие влияние заглубления на амплитуды колебаний на обычных фундаментах без свай. Анализ литературы, посвященный рассматриваемой проблеме, позволяет сделать вывод об актуальности получения опытных данных, представляющих большой интерес для инженерной практики и дальнейших теоретических исследований.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению поведения свайного фундамента с заглубленным ростверком под воздействием динамических воздействий, которое проводилось в лаборатории, на опытном полигоне и в натурных условиях. По единой схеме выполнялись серии динамических нагружений для различных вариантов заглубления ростверка, количества и характера размещения свай в плане, плотности окружающего грунта (рис. 1).

Динамическая нагрузка в вертикальном и горизонтальном направлениях создавалась двухвальным вибратором, устанавливаемым на испытуемый фундамент. В процессе исследований проводилась регистрация амплитуд колебаний ростверка и перемещений ствола сваи при вертикальном и горизонтальном действии возбуждающих сил. Для определения и регистрации параметров колебаний использовалась виброизмерительная установка, в состав которой входили внешний модуль АЦП, комплекты вибродатчиков, набор соединительных проводов и персональный компьютер. Для определения изгибающих моментов применялись тензометрированные сваи. В каждой серии испытаний измерения проводились в диапазоне частот от 0 до 45 Гц, когда соотношение динамической и статической нагрузок не превышало 0,2.

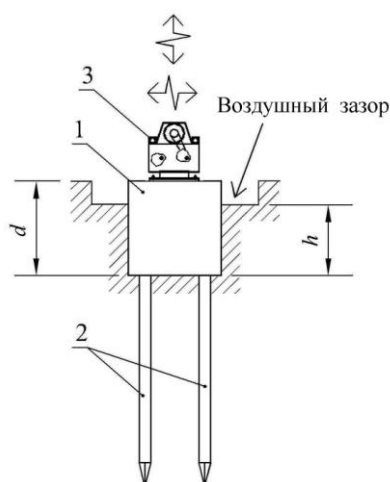


Рис. 1. Схема фундамента

1 – ростверк, 2 – сваи, 3 – вибратор, h – высота засыпки, d – глубина заложения

В лабораторных условиях исследования проводились в грунтовом лотке размерами $3,0 \times 3,0 \times 2,0$ м. Лоток заполнялся мелкозернистым воздушносухим песком с соблюдением требований по его равномерному уплотнению. В качестве испытуемого фундамента использовался металлический ростверк $0,71 \times 0,71 \times 0,80$ м с моделями пяти или девяти свай диаметром 42 мм и длиной 840 мм. Сваи изготавливались из металлических труб с толщиной стенки 2,8 мм. Конструкция ростверка предусматривала жесткое закрепление свай и позволяла изменять его боковой контакт с грунтом по боковой поверхности. Расстояние между осями соответствовало их шести диаметрам, что обеспечивало получение результатов без взаимного влияния свай в кусте. Для регистрации динамических напряжений одна из свай тензометрировалась. Рассматривалось влияние глубины засыпки $0 \leq h/d \leq 1$ (рис. 1) и количества свай на амплитуду колебаний и моменты, возникающие в стволе свай.

При проведении исследований на полигоне опытный свайный фундамент имел монолитный железобетонный ростверк с габаритными размерами $1,0 \times 1,0 \times 1,0$ м, опирающийся на 4 сваи диаметром 114 мм с рабочей длиной 2 м. Сваи изготавливались из металлических труб с толщиной стенки 4 мм. Расстояние между осями свай, так же, как и в лабораторном эксперименте, было равным шести диаметрам. Для регистрации динамических напряжений одна из свай тензометрировалась. Сваи имели жесткое крепление в теле ростверка. Опалубкой при бетонировании служили тщательно выровненные стенки котлована. Почва полигона до глубины 9,3 м состояла из лессовидной маловлажной твердой супеси, подстилаемой полутвердыми суглинками. Грунтовые воды на площадке отсутствовали.

С использованием фундамента были проведены серии экспериментов при условиях:

- 1) боковые поверхности ростверка соприкасаются непосредственно с естественным грунтом;
- 2) отсутствие контакта между боковыми поверхностями ростверка с грунтом;
- 3) боковые поверхности ростверка взаимодействуют с окружающим грунтом через утрамбованную обратную засыпку.

В натуральных условиях испытания проводились на одной из городских строительных площадок. Геологический разрез площадки был представлен насыпным грунтом из супеси с включением битого кирпича мощностью 1,5 м,

супесью пылеватой с прослоями суглинка мощностью до 2,5 м, суглинком легким пылеватым с прослоями супеси мощностью до 10 м. Исследуемый фундамент представлял собой монолитный железобетонный ростверк стаканного типа с размерами 1,2×1,2×1,0 м на двух сборных железобетонных сваях С6-30. Расстояние между осями свай составляло 0,9 м. Эксперименты выполнялись для двух случаев: при заглублении с полным контактом боковых поверхностей с грунтом и для откопанного ростверка, лежащего на грунте. Измерялись амплитуды колебаний в зависимости от заглубления и направления прикладываемой нагрузки.

На рис. 2 представлены данные, полученные в ходе лабораторных экспериментов. Графики отображают зависимости амплитуды от частоты вертикальных (рис. 2, а) и горизонтальных (рис. 2, б) колебаний при различных заглублениях и пяти (штриховые линии) или девяти (сплошные линии) сваях в плане.

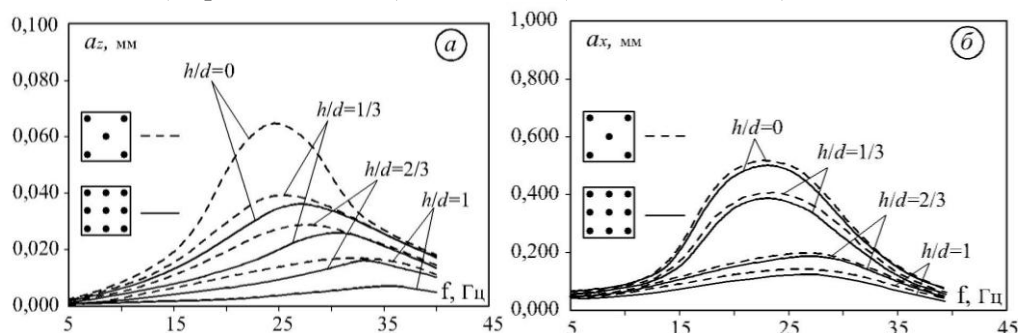


Рис. 2. Амплитуды колебаний свайного фундамента для различных вариантов заглубления ростверка

По результатам измерений определено, что при уменьшении площади контактирования между грунтом и боковой поверхностью фундамента амплитуды колебаний возрастают. Согласно полученных данных наиболее значительный прирост наблюдается при $h/d < 2/3$. Это справедливо как для вертикальных, так и для горизонтальных колебаний. При вертикальных колебаниях по мере уменьшения заглубления амплитуды увеличиваются до четырех раз от 0,01 до 0,04 мм для фундамента с девятью сваями, и от 0,018 до 0,065 мм для фундамента с пятью сваями. При горизонтальных колебаниях амплитуды увеличивались до 5 раз от 0,1 до 0,5 мм в случае девяти свай и от 0,12 до 0,51 мм при пяти сваях. Необходимо отметить, что увеличение количества свай в ростверке с 5 до 9 приводит к уменьшению амплитуд при вертикальных колебаниях в 1,5 раза, а при горизонтальных – на 10-15%.

Рис. 3 отображает величины изгибающих моментов в тензометрированной свае длиной 840 мм при изменении заглубления ростверка на частотах вынужденных колебаний 15 Гц (граница увеличения амплитуд) и 25 Гц (точка в резонансной области). Из представленных данных следует, что при уменьшении заглубления изгибающие моменты в середине сваи увеличиваются более чем в 2 раза при 15 Гц – от 1,1 до 2,4 Нм для девяти свай и от 1,2 до 2,5 Нм для пяти свай, а в зоне закрепления до 3 раз – 0,8 до 2,6 Нм (девять свай), от 1,0 до 2,8 Нм (пять свай). Это наблюдается и при частоте 25 Гц, в середине сваи от 1,3 до 2,6 Нм (девять свай), от 1,7 до 4,3 Нм (пять свай). Наибольший прирост величин изгибающих моментов происходит при $h/d < 1/2$. Область максимальных значений располагается на глубине от 200 до 400 мм. Из представленных результатов следует, что увеличение количества свай в ростверке способствует уменьшению изгибающих моментов во всех ее сечениях от 5 до 10%.

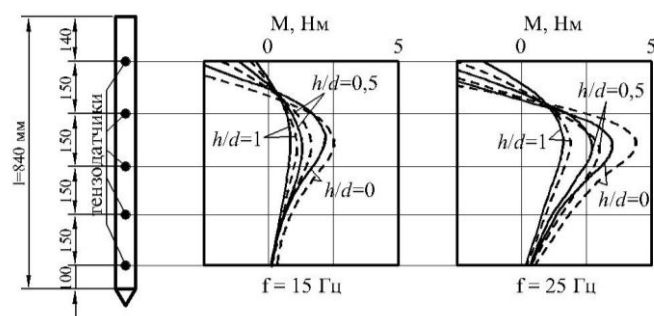


Рис. 3. Схема размещения тензодатчиков на свае и величины изгибающих моментов в кустах из девяти (сплошная линия) и пяти (штриховая линия) свай

На рис. 4, 5 представлены данные полученные на полигоне. Рис. 4 иллюстрирует амплитуды в зависимости от частоты колебаний для различных заглублений ростверка при вертикальном (рис. 4, а) и горизонтальном (рис. 4, б) приложениях динамической нагрузки.

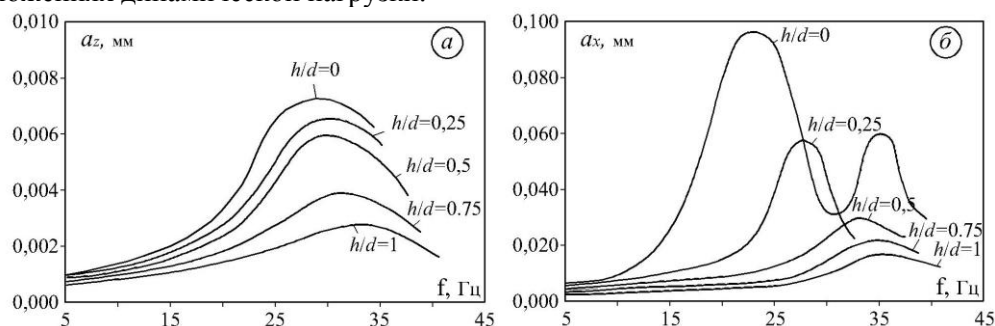


Рис. 4. Амплитуды колебаний при различных заглублениях ростверка

По результатам измерений было определено, что в супесчаных грунтах наблюдается такой же эффект, как и в песчаных. При уменьшении заглубления (h/d изменяется от 1 до 0) амплитуды колебаний ростверка увеличиваются. При вертикальных колебаниях до четырех раз – от 0,002 до 0,008 мм, при горизонтальных колебаниях до пяти раз – от 0,02 до 0,1 мм. При уменьшении h/d наблюдается понижение резонансной частоты, при вертикальных колебаниях от 35 до 27 Гц, при горизонтальных – от 35 до 23 Гц. Наличие второго резонансного пика при горизонтальных колебаниях незаглубленного свайного фундамента ($h/d = 0$) на частоте 35 Гц (рис. 4, б) обусловлено появлением дополнительной вращательной составляющей в горизонтальной плоскости ростверка из-за потери контакта между его подошвой и грунтом. Наиболее значительный прирост амплитуды наблюдается при $h/d < 0,75$ для вертикальных колебаний и при $h/d < 0,5$ в случае горизонтальных приложений динамических воздействий.

На рис. 5 отображено изменение амплитуды в зависимости от частоты колебаний и различных заглублений ростверка при состоянии грунта – ненарушенная и нарушенная (обратная засыпка) структура для вертикального (рис. 5, а) и горизонтального (рис. 5, б) приложений динамической нагрузки.

По результатам измерений определено, что влияние грунта ненарушенной структуры, взаимодействующего с боковыми поверхностями ростверка, более значительно, чем грунта обратной засыпки. Несмотря на тщательное уплотнение, зарегистрированные амплитуды колебаний при различных уровнях заглубления ростверка всегда были больше аналогичных значений для грунта ненарушенной структуры. При вертикальных колебаниях от 20% ($h/d = 0,5$) до 70% ($h/d = 1$). При горизонтальных колебаниях до 100%. Очевидно, что эффектив-

ность влияния обратной засыпки на параметры колебаний фундаментов может увеличиваться пропорционально степени ее уплотнения.

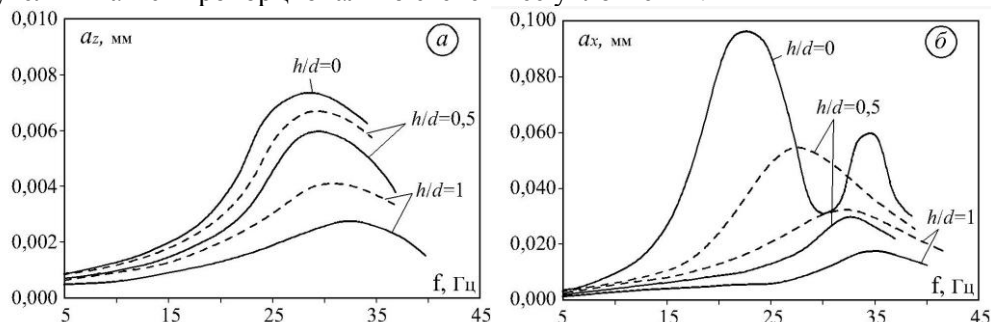


Рис. 5. Амплитуды колебаний свайного фундамента при ненарушенной (сплошные линии) и нарушенной (штриховые линии) структуре грунта

Рис. 6 иллюстрирует изменения изгибающих моментов в тензометрированной свае длиной 2300 мм в зависимости от заглубления ростверка в ненарушенном грунте на частотах вынужденных колебаний 15 и 25 Гц. Из представленных данных следует, что при уменьшении заглубления изгибающие моменты в свае увеличиваются до 2 раз при частоте 15 Гц – от 2,0 до 4,0 Нм, и до 3 раз при частоте 25 Гц – от 3,0 до 9,0 Нм. Область максимальных значений находится на глубине от 500 до 1000 мм.

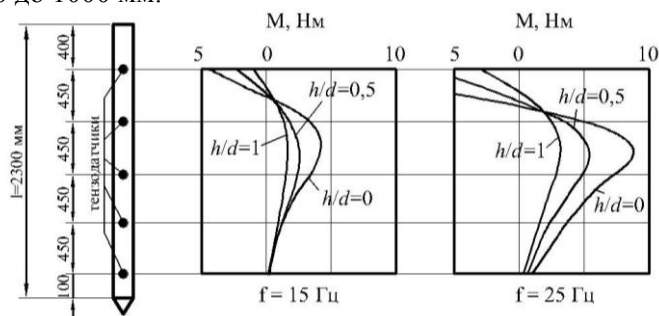


Рис. 6. Схема размещения тензодатчиков на свае и величины изгибающих моментов при 4 сваях в кусте

На рис. 7 представлены результаты натурных исследований. По результатам измерений было определено, что при вертикальных колебаниях конструкции по мере уменьшения заглубления ростверка амплитуда увеличивается в 2,3 раза (рис. 7, а). Для горизонтальных колебаний исследовались два направления приложения динамической нагрузки – вдоль (штриховая линия) и поперек (сплошная линия) плоскости двух свай. Было установлено, что ориентация свай по отношению к направлению действующей динамической нагрузки, влияет на амплитуды колебаний фундаментов (рис. 7, б). При заглублении ростверка в случае динамического воздействия вдоль плоскости свай амплитуды колебаний были до 1,5 раз меньше, чем при таком же воздействии в поперечном направлении. При отсутствии заглубления ростверка ($h/d = 0$) на частоте 30 Гц амплитуды колебаний равнялись 0,12 мм и 0,16 мм в случаях действия нагрузки вдоль и поперек плоскости свай соответственно. Здесь определяющую роль играет сопротивление свайного основания сдвигающим и моментным нагрузкам.

Результаты экспериментов, проведенных в лаборатории, на опытном полигоне и в натуральных условиях, позволяют сделать следующие выводы. Было установлено, что заглубление ростверка (площадь контакта боковых поверхностей с окружающим грунтом) оказывает существенное влияние на динамическое поведение свайного фундамента.

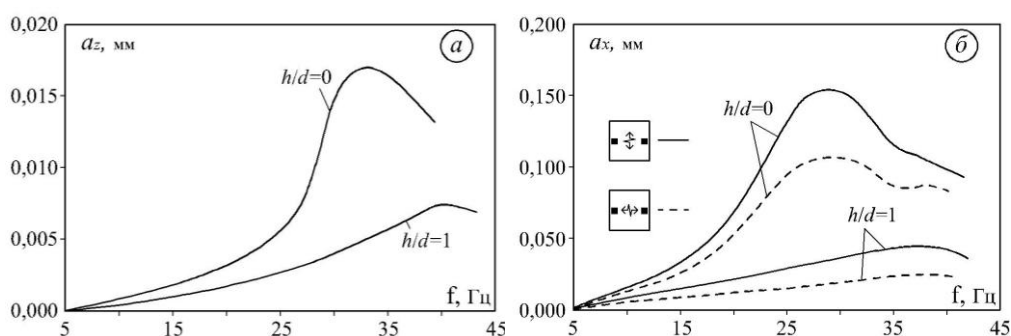


Рис. 7. Амплитуды колебаний свайного фундамента для различных заглублений ростверка при вертикальном (а) и горизонтальном (б) динамических воздействиях

Увеличение заглубления приводит к повышению резонансных частот и снижению амплитуд колебаний. Наибольший эффект проявляется при горизонтальных колебаниях. При полной откопке ростверка амплитуды горизонтальных колебаний, увеличивались до пяти раз. Плотность окружающего грунта также влияет на уровень амплитуд колебаний. Увеличение количества свай в ростверке повышает жесткость основания и позволяет понизить амплитуды колебаний в любой точке частотного диапазона. Изгибающие моменты в сваях при полном заглублении ростверка и отсутствии контакта по его боковой поверхности при различных частотах вынужденных колебаний различаются до трех раз. Эксперименты в натуральных условиях показали, что изменением расположения свай в кусте по отношению к направлению горизонтальных возмущений, можно добиться существенного снижения амплитуд колебаний фундамента.

Л и т е р а т у р а

1. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 32 с.
2. Забылин М.И. Расчет фундаментов под машины. – Новосибирск: Изд-во НИСИ, 1983. – 83 с.
3. Баранов В.А. О расчете вынужденных колебаний заглубленного фундамента // Вопросы динамики и прочности: Тр. Риж. ПИ. – Рига, 1967. – №14. – С. 195-209.
4. Нурждин Л.В. Учет взаимодействия ростверка с грунтом при колебаниях свайных фундаментов // Механика грунтов и фундаментостроение: Тез. докл. нац. науч.-техн. конф. – СПб., 1995. – С. 505-510.
5. Колесников А.О., Попов В.Н. Оценка влияния заглубления ростверка при колебаниях свайного фундамента // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – № 2. – С. 55-61.
6. Пятецкий В.М., Александров Б.К., Савинов О.А. Современные фундаменты машин и их автоматизированное проектирование. – М.: Стройиздат, 1993. – 424 с.
7. Колоушек В. Динамика строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1965. – 630 с.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE PILE-CAP DEEPENING AT VIBRATION OF A PILE FOUNDATION

A.O. Kolesnikov, V.N. Popov

Experimental researches of pile foundations dynamic behavior with deepened pile-cap are carried out. Estimations of influence on amplitudes of vibrations of such factors as deepening of the pile-cap, quantity of piles in the foundation, structure of a ground, orientation of a pile bush in relation to a direction of vibrations are received. It is certain, that deepening of the pile-cap it is possible to achieve essential decrease in amplitudes of vibrations.

KEY WORDS: dynamics, pile foundation, deepened pile-cap