



УДК 624.154.1

Ю. С. ГРИГОРЬЕВ, канд. техн. наук, проф. кафедры архитектуры;
В. В. ФАТЕЕВ, ст. преп. кафедры архитектуры

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ВИСЯЧЕЙ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ СВАИ В МАССИВЕ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-19-57;
эл. почта: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru

Ключевые слова: компьютерная модель, висячая призматическая свая, грунтовый массив, вертикальная и горизонтальная нагрузки, верификация, валидация.

Приведены результаты разработки и апробации компьютерной модели работы висячей призматической сваи в массиве глинистого грунта с использованием программного комплекса "MIDAS GTS NX", предназначенной для исследования совместной работы свайных фундаментов различных типов с грунтовым основанием.

Программные комплексы *PLAXIS*, *ZSOIL*, *FEMmodels*, *MIDAS GTS* и другие существенно расширяют возможности специалистов в исследованиях работы фундаментных конструкций, позволяют существенно расширить объем исследований по анализу эффективности использования различных типов фундаментов и выбору из них наиболее рационального варианта, особенно при необходимости их устройства в сложных инженерно-геологических условиях, и вместе с тем позволяют значительно сократить объем натурных испытаний, которые могут быть выполнены лишь для подтверждения правильности выбранных компьютерных моделей фундаментов и их конструктивных решений. Вместе с тем ошибки, допущенные при разработке компьютерных моделей фундаментов и геомеханических моделей грунтовых оснований, используемых в дальнейшем для обоснования проектных решений, могут привести к деформациям зданий и сооружений и даже к их разрушению [1], поэтому в такого рода исследованиях на первый план выходит необходимость апробации компьютерных моделей с использованием процедур верификации¹ и валидации², разработанных ведущими мировыми организациями в области инженерных расчетов *NAFEMS*³ и *ASME*⁴ (рис. 1) [2, 3]. В качестве критериев верификации разработанной авторами компьютерной модели использовались результаты натурных испытаний свай в полевых условиях при действии на сваи вертикальных вдавливающих, выдергивающих и горизонтальных нагрузок.

¹Верификация (verification — проверка, контроль) — это процесс, позволяющий получить ответ на вопросы: «Сделана ли геомеханическая модель правильно? Реализованы ли в модели все необходимые функции?».

²Валидация (validation — придание законной силы) — это процесс определения степени соответствия расчетной модели реальному физическому объекту в рамках области планируемого использования данной модели. Результаты валидации позволяют дать ответ на вопрос: «Правильно ли реализована функциональность разработанной модели?».

³International Association for the Engineering Modeling, Analysis and Simulation Community.

⁴American Society of Mechanical Engineers.

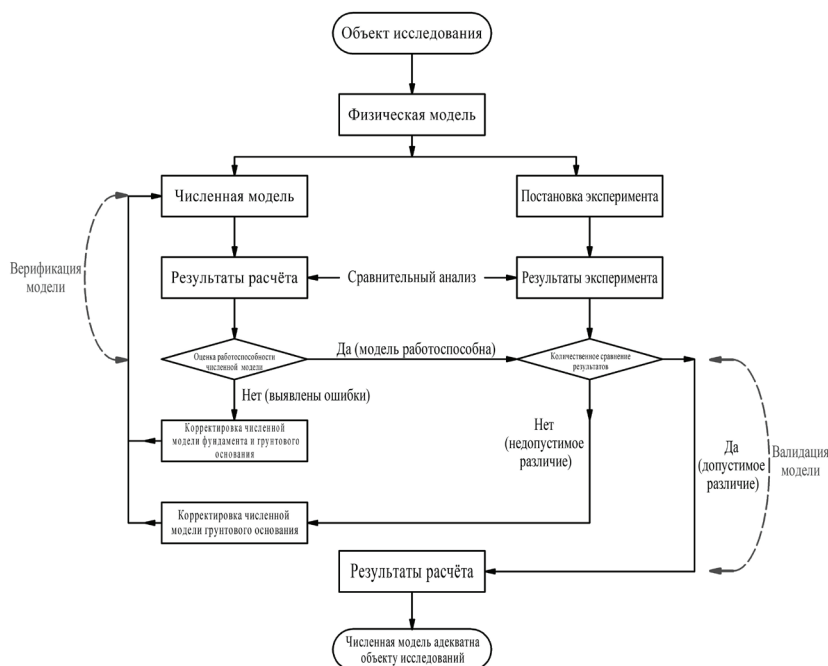


Рис. 1. Блок-схема верификации и валидации компьютерной модели сваи в грунтовом массиве

Математическое моделирование процесса взаимодействия забивной призматической свайей с грунтовым массивом в пространственной постановке было выполнено авторами с использованием программного комплекса *MIDAS GTS NX*, использующегося при проектировании уникальных объектов гражданского, промышленного и транспортного назначения.

Создание компьютерных моделей сваи и грунтового массива с анализом их работы было выполнено последовательно в несколько этапов, при этом во всех случаях расчетная область состояла из модели грунтового основания в виде куба с размерами $15 \times 15 \times 15$ м и забивной железобетонной сваи сечением $0,3 \times 0,3$ м длиной 7 м, погруженной в грунт на 6 м, что позволило исключить влияние размеров расчетной области на результаты расчетов (рис. 1 цв. вклейки).

Расчетный случай № 1

В расчетном случае № 1, использовавшимся некоторыми авторами в исследовании работы свайных фундаментов разных типов в различных грунтовых условиях, принимаются следующие условия:

1. Расчетная область формируется программным комплексом автоматически. Для формирования расчетной области грунтового массива используется укрупненная гибридная (комбинированная) форма сетки, состоящая из объемных элементов – тетраэдров и гексаэдров.
2. Призматическая свая сечением $0,3 \times 0,3$ м и длиной 6 м моделируется трехмерными пространственными элементами (гексаэдрами) с размерами $0,3 \times 0,3 \times 0,2$ м.
3. Взаимодействие сваи и околосвайного грунта моделируется жесткими связями, сформированными автоматически при формировании расчетной области.
4. Объемные силы от собственного веса сваи и собственного веса грунта ос-

К СТАТЬЕ Ю. С. ГРИГОРЬЕВА, В. В. ФАТЕЕВА
«КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ВИСЯЧЕЙ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ
СВАИ В МАССИВЕ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА»

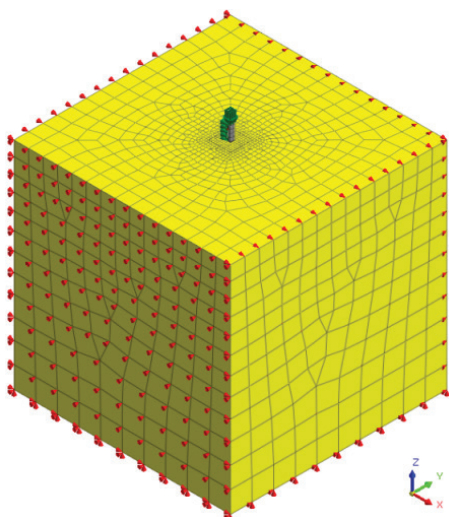


Рис. 1. Компьютерная модель расчетной области висячей призматической сваи, разработанная в *MIDAS GTS NX*

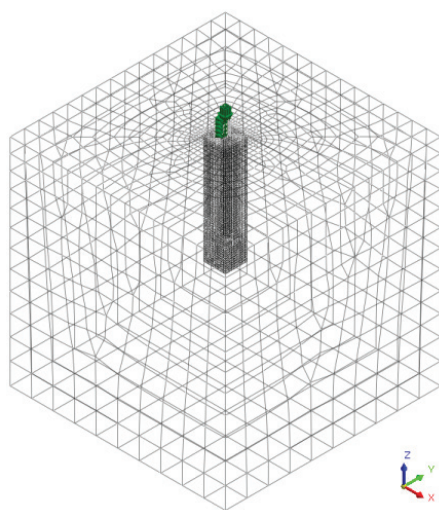


Рис. 2. То же, см. рис. 1. Со сгущенной сеткой конечных элементов в области околосвайного пространства

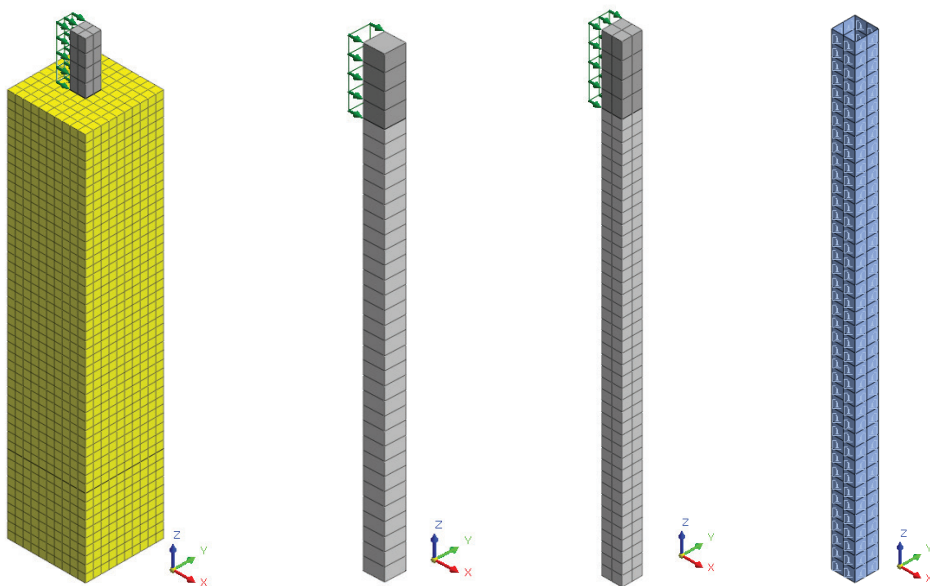


Рис. 3. Трехмерные компьютерные модели: 1 – околосвайного массива грунта; 2 и 3 – призматической сваи соответственно с крупным и мелким шагом разбивки сетки конечных элементов; 4 – интерфейсные элементы на контакте сваи и грунта

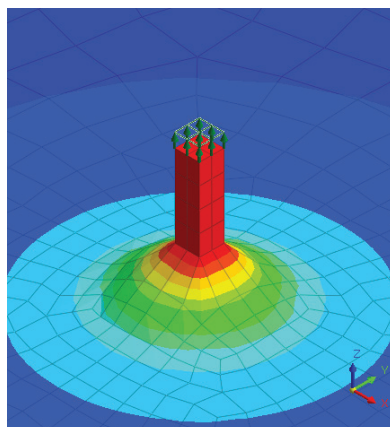
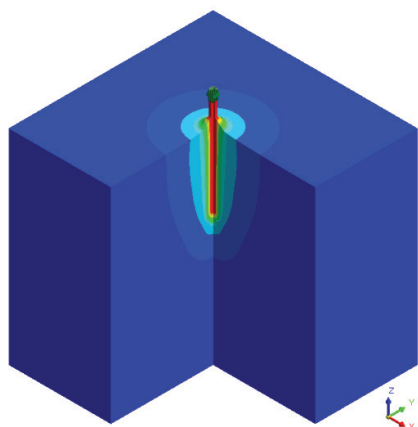


Рис. 4. Расчетный случай № 2. Изополя вертикальных перемещений (по оси Z) свайей призматической свай и околосвайного грунта при действии вертикальной выдергивающей нагрузки P

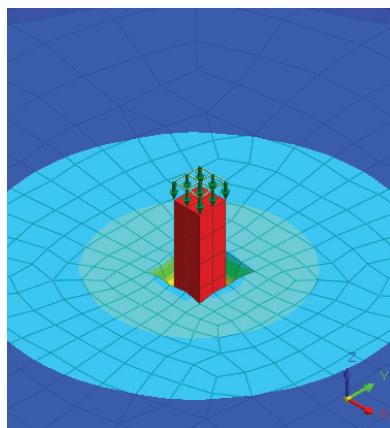
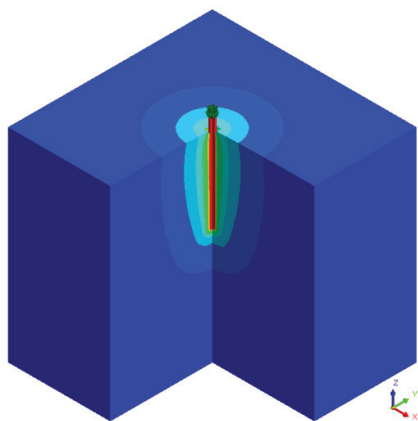


Рис. 5. Расчетный случай № 2. Изополя вертикальных перемещений (по оси Z) свайей призматической свай и околосвайного грунта при действии вертикальной вдавливающей нагрузки N

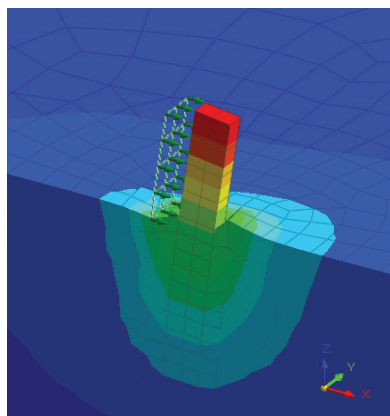
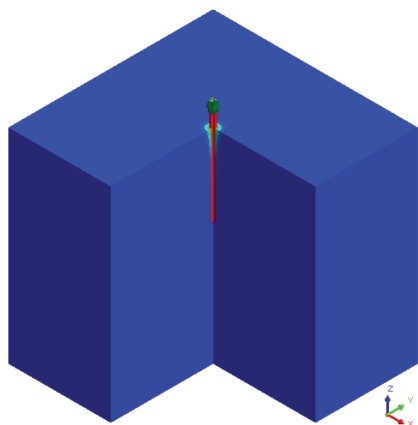


Рис. 6. Расчетный случай № 2. Изополя горизонтальных перемещений (по оси X) свайей призматической свай и окружающего грунта при действии горизонтальной нагрузки H

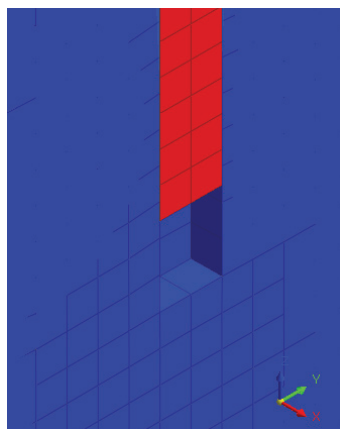
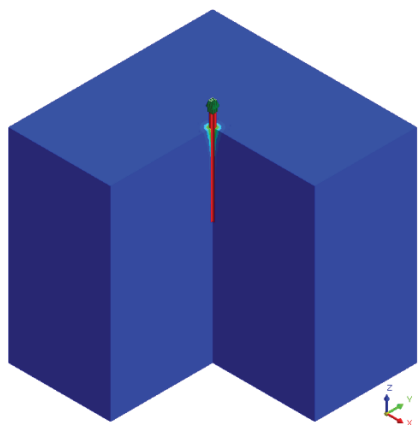


Рис. 7. Расчетный случай № 4. Изополя вертикальных перемещений (по оси Z) висячей призматической сваи и околосвайного грунта при действии вертикальной выдергивающей нагрузки P в стадии срыва

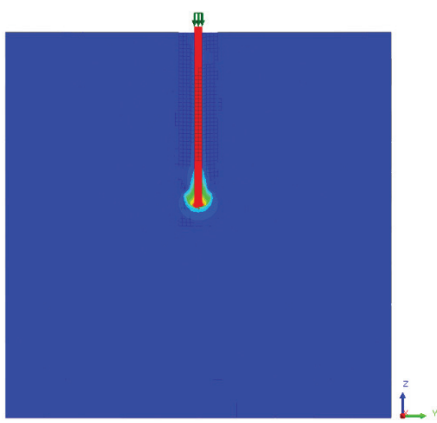
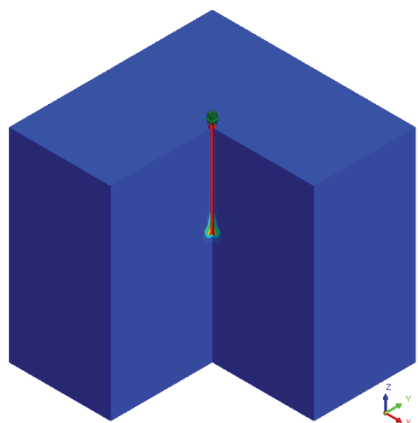


Рис. 8. Расчетный случай № 4. Изополя вертикальных перемещений (по оси Z) висячей призматической сваи и околосвайного грунта при действии вертикальной вдавливающей нагрузки N в стадии срыва

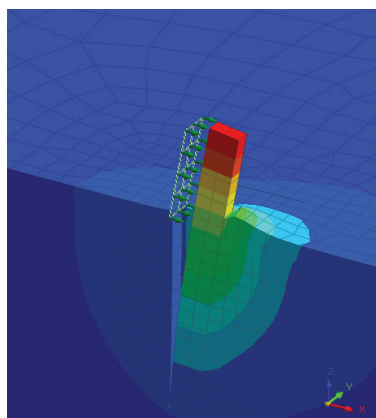
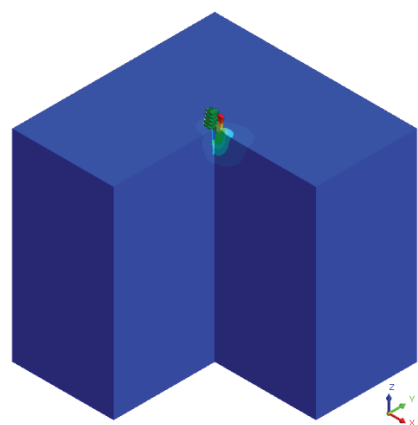


Рис. 9. Расчетный случай № 4. Изополя горизонтальных перемещений (по оси X) висячей призматической сваи и околосвайного грунта при действии горизонтальной нагрузки H

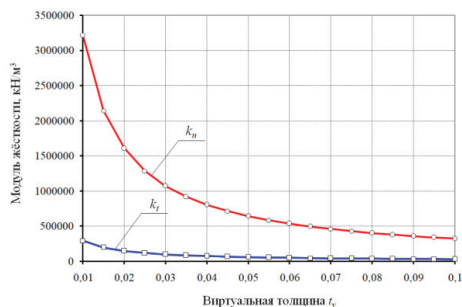


Рис. 10. Графики изменения величины модулей жесткости k_n и k_t в зависимости от виртуальной толщины контактного элемента t_v

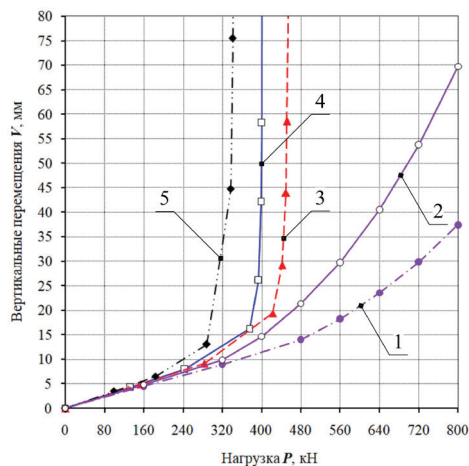


Рис. 11. Графики зависимости вертикальных перемещений V , мм от вертикальных выдергивающих нагрузок P : 1–5 – номера расчетных случаев

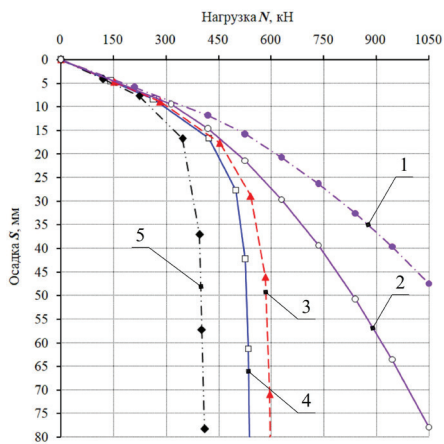


Рис. 12. Графики зависимости осадок S от вертикальных вдавливающих нагрузок N : 1–5 – номера расчетных случаев

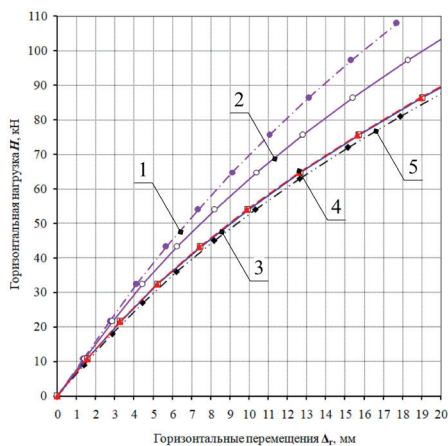


Рис. 13. Графики зависимости горизонтальных перемещений Δ_r от горизонтальных нагрузок H : 1–5 – номера расчетных случаев



нования создаются программным комплексом автоматически с использованием введенных в программу значений объемного веса грунта и материала свай.

Расчётный случай № 2

Отличия расчетного случая № 2 от расчетного случая № 1 заключаются в следующем:

1. Околосвайная зона в виде фрагмента грунтового массива сформирована из конечных элементов правильной формы – кубов с размером граней 0,15 м (рис. 2 и 3 цв. вклейки).
2. Модель свай сформирована из конечных элементов-кубов с размером граней 0,15 м (рис. 3 цв. вклейки).

Расчетные случаи № 3, 4 и 5

Совместная работа призматических свай и околосвайного грунта, обеспечиваемая работой контактного слоя грунта толщиной 10–100 мм, представляющего собой тонкую оболочку с определенными физико-механическими свойствами, моделируется применением интерфейсных элементов, разделяющих связанные узлы между конечными элементами свай и грунта (рис. 3 цв. вклейки). Свойства контактных интерфейсных элементов описываются такими параметрами как: модуль нормальной жесткости; модуль сдвиговой жесткости; удельное сцепление; угол внутреннего трения; угол дилатансии и прочность грунта при растяжении.

Отличие расчетных схем № 3, № 4 и № 5 от расчетной схемы № 2 заключается в том, что в расчетные модели вводятся интерфейсные элементы с модулями жесткости, соответствующими виртуальной толщине $t_v = 0,03$ (схема № 3), $t_v = 0,04$ (схема № 4) и $t_v = 0,1$ (схема № 5) (см. рис. 10 цв. вклейки).

При выполнении численных расчетов назначались следующие граничные условия по закреплению и перемещениям расчетной области:

- на верхней горизонтальной поверхности расчетной области – свободное перемещение узлов по всем направлениям;
- на вертикальных гранях – свободное перемещение в вертикальном направлении (вдоль оси Z) и запрет на горизонтальные перемещения (вдоль осей X и Y);
- на нижней горизонтальной плоскости – запрет на перемещения по всем направлениям.

Для моделирования работы однородного грунтового основания, сложенного суглинками, использовалась упругопластическая модель Мора-Кулона и характеристики грунта естественного сложения: удельный вес $\gamma = 16,8$ кН/м³; коэффициент пористости $e = 0,846$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,37$; удельное сцепление $c = 20$ кПа; угол внутреннего трения $\varphi = 22^\circ$; модуль деформации $E = 8$ МПа, принятыми по материалам инженерно-геологических изысканий, выполнявшихся на одном из участков застройки нагорной части Нижнего Новгорода.

В результате выполненных исследований было установлено:

1. Результаты серии тестовых расчетов (расчетная схема № 1) позволили определить оптимальные размеры расчетной области, а также оптимальные размеры и форму конечных элементов.
2. Для повышения точности расчетов и упрощения работы по извлечению их результатов целесообразно разбивать поперечное сечение свай и массив околосвайного грунта на элементы правильной формы – гексаэдры (расчетная схема № 2).
3. Моделирование взаимодействия свай и грунта жесткими связями (без интерфейсных элементов контакта) приводит к несоответствию результатов численных расчетов и результатов как натурных испытаний свай, так и испытаний моделей свай (рис. 2, 3). Это несоответствие проявляется в следующем:

1) в отсутствии «срыва» сваи при действии вертикальных вдавливающих и выдергивающих нагрузок (рис. 11, 12 цв. вклейки). В этом случае даже при значительных вертикальных нагрузках грунт испытывает одинаковые по величине и направлению со свайе деформации (рис. 4, 5 цв. вклейки);

2) при горизонтальных перемещениях под действием горизонтальной нагрузки грунт «прилипает» к задней (тыльной) стенке сваи и перемещается вместе со свайе в горизонтальном направлении (рис. 6, 13 цв. вклейки), что противоречит результатам натурных испытаний свай и испытаний физических моделей свай в лабораторных условиях (рис. 1, 2).



Рис. 2. Железобетонная свая длиной 2,75 м, сечением 120×120 мм, в суглинках твердой консистенции. В результате испытаний горизонтальной нагрузкой между задней (тыльной) частью боковой поверхности сваи и грунтом образовался зазор в 50 мм (отрыв сваи от грунта) [4]



Рис. 3. Деревянная модель сваи длиной 0,6 м, сечением 30×30 мм, в песчаном грунтовом массиве. В результате испытаний горизонтальной нагрузкой между тыльной частью боковой поверхности модели и грунтом образовался зазор в 15 мм [5]

4. Качественное совпадение характера работы свай в натурных условиях на вдавливающие, выдергивающие и горизонтальные нагрузки в наибольшей степени соответствует модели, в которой взаимодействие сваи с грунтом моделируется с применением контактных интерфейсных элементов при виртуальной толщине контактного слоя $t_v = 0,03-0,05$ (рис. 7–9, 11–13 цв. вклейки). В этом случае модель взаимодействия свай с грунтовым массивом посредством интерфейсных контактных элементов позволяет получить «срыв» сваи по достижении ее предельной несущей способности в испытаниях вертикальными нагрузками и «отрыв» тыльной части боковой поверхности сваи при испытаниях горизонтальной нагрузкой. Грунтовой массив в этих случаях не следует за перемещениями сваи в отличие от расчетных схем № 1 и № 2. При этом тщательный подбор величины модулей жесткости интерфейсных элементов позволяет достичь удовлетворительного количественного совпадения результатов компьютерного моделирования с результатами натурных испытаний свай.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Grigor'ev, Yu. S. Reasons for deformation and failure of the structural units of an apartment building on a slopeside site / Yu. S. Grigor'ev, V. V. Fateev. // Soil Mechanics and Foundation Engineering / Springer Science+Business Media. – New York, 2017. – Vol. 54, № 5. – P. 318–323.
2. Григорьев, Ю. С. Верификация и валидация геомеханической модели грунтового основания деформирующегося здания / Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2018. – № 3 (47). – С. 16–22.
3. Верификационный отчет по программному комплексу MIDASGTS. Том 1. Общие сведения. Матрица верификации. – Москва : Подземпроект, 2012. – 88 с. – Текст : непосредственный.
4. Довгий, А. Н. Продольно-поперечный изгиб стержней в упруго-податливой среде с учетом физической нелинейности материала : специальность 01.02.03 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Н. Довгий – Харьков, 1984. – 193 с. : ил. – Текст : непосредственный.
5. Фатеев, В. В. Исследования работы горизонтально нагруженных моделей свайных фундаментов с однорядным расположением призматических свай / В. В. Фатеев. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2014. – № 2 (30). – С. 68–70.

GRIGOREV Yury Semyonovich, candidate of technical sciences, professor of the chair of architecture; FATEEV Valery Valerevich, senior teacher of the chair of architecture

COMPUTER MODEL OF THE OPERATION OF A HANGING PRISMATIC PILE IN AN ARRAY OF CLAY SOIL

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 430-19-57;
e-mail: yus-gri@rambler.ru, valeriy-fateev@rambler.ru

Key words: computer model, hanging prismatic pile, soil array, vertical and horizontal loads, verification, validation.

The article presents the results of the development and testing of a computer model of the operation of a hanging prismatic pile in an array of clay soil using the software package "MIDAS GTS NX", designed to study the joint work of pile foundations of various types with a soil base.

REFERENCES

1. Grigorev Yu. S. Reasons for deformation and failure of the structural units of an apartment building on a slopeside site / Yu. S. Grigorev, V. V. Fateev. // Soil Mechanics and Foundation Engineering / Springer Science+Business Media New York. – 2017. – Vol. 54, . № 5. – P. 318–323.
2. Grigorev Yu. S., Fateev V. V. Verifikatsiya i validatsiya geomekhanicheskoy modeli gruntovogo osnovaniya deformiruyuschegosya zdaniya [Verification and validation of a geomechanical model of a soil basis of a deforming building]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2018. № 3. P. 16–22.
3. Verifikatsionny otchyot po programmnomu kompleksu MIDAS GTS. Tom 1. Obshchie svedeniya. Matritsa verifikatsii [MIDAS GTS Software Complex Verification Report. Volume 1. General information. Verification matrix]. Moscow : Podzemproekt, 2012. – 88 p.
4. Dovgiy A. N. Prodolno-poperechny izgib stержней v uprugopodatlivoy srede s ucheyotom



fizicheskoy nelineynosti materiala [Longitudinal-transverse bending of rods in elastic-malleable medium considering physical nonlinearity of material] : spetsialnost 01.02.03 : dis. ... cand. tekhn. nauk. – Kharkov, 1984. – 193 p.: il.

5. Fateev V. V. Issledovaniya raboty gorizontально nagruzhennykh modeley svaynykh fundamentov s odnoryadnym raspolozheniem prizmaticheskikh svay [Researches on the function of horizontally loaded models of single-row prismatic piles foundations]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod. 2014. № 2. P. 68–70.

© Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев, 2022

Получено: 27.12.2021 г.

УДК 699.844:692.23

А. А. КОЧКИН, д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства; **Л. Э. ШАШКОВА**, канд. техн. наук, доц. кафедры промышленного и гражданского строительства; **Н. А. КОЧКИН**, канд. техн. наук, доц. кафедры промышленного и гражданского строительства; **А. В. ИВАНОВА**, ст. преп. кафедры промышленного и гражданского строительства

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»

Россия, 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15. Тел.: (817) 251-83-96; эл. почта: kochkinaa@vogu35.ru

Ключевые слова: звукоизоляция, однослойные ограждения, слоистые вибродемпфированные элементы, изменение изгибной жесткости, гибкие плиты на относе, двойные ограждения.

Представлены способы повышения звукоизоляции различных видов ограждающих конструкций при сравнении с однослойными ограждениями равной поверхностной плотности. Показано, что приблизить частотную характеристику звукоизоляции конструкции до «закона массы» возможно использованием слоистых вибродемпфированных элементов и путем изменения изгибной жесткости и повышения коэффициента потерь ограждения. Использование данных ограждений по сравнению с листами, соединенными «насухо», позволяет повысить звукоизоляцию двойных ограждающих конструкций.

За последние 50–60 лет со времени массового строительства гражданских и промышленных зданий по типовым проектам несколько раз ужесточались нормативные требования к звукоизоляции ограждающих конструкций. При реконструкции и капитальном ремонте существующих зданий требуется повышать звукоизоляцию ограждений до существующих в настоящее время нормативных требований. Кроме этого сейчас возникает много обращений жильцов к строительным организациям на недостаточную звукоизоляцию межквартирных перегородок и междуэтажных перекрытий. Часто это объясняется экономией материалов и отсутствием знаний по способам повышения звукоизоляции ограждений. Так, для защиты от проникновения из соседнего помещения межквартирную двойную перегородку из кирпича «усиливают» поперечными вертикальными связями из