

6. ТКП 45-1.03-314-2018*. Возведение строительных конструкций зданий и сооружений. Основные требования. – Введ. 01.07.2018. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2019. – 131 с.

7. ТКП EN 1992-1-1-2009*. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Введ. 01.01.2010. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2015. – 205 с.

8. СТБ EN 13670-2012. Возведение бетонных и железобетонных конструкций. – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2013. – 61 с.

9. СП 70.13330-2012 с изм. № 1–3. Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87. Институт ОАО НИЦ «Строительство». – М., 2013 – 243 с.

УДК 624.04

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ GAP-ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ «КАРКАС ЗДАНИЯ – СВАЙНЫЙ ФУНДАМЕНТ – ОСНОВАНИЕ»

БОРИСЕВИЧ А. А., ЗВЕРЕВ В. Ф., ТРЕПАЧКО В. М., ЩЕРБАК С. Б.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. Разработана конечно-элементная модель системы типа «Каркас здания – Свайный фундамент – Основание». Предложена модель взаимодействия свайного куста с грунтовым массивом.

В модели использованы: линейный элемент типа ROD, работающий на растяжение (сжатие), для описания арматуры в колоннах, ригелях и сваях; твердотельный 8-узловой конечный элемент типа SOLID для описания железобетонных элементов каркаса, свай и основания; специальный элемент GAP, предназначенный для моделирования зазоров или натягов в контактных задачах.

Выполненный анализ указанной многопараметрической системы позволил получить основные параметры, необходимые для оценки

напряженно-деформированного состояния (НДС) системы: максимальные и минимальные напряжения в арматуре и бетоне, эквивалентные напряжения по гипотезе энергии формоизменения (Мизеса) в объемных конечных элементах SOLID, перемещения узлов по направлениям координатных осей.

Показана количественная и качественная картина распределения напряжений в грунте.

Конечно-элементная модель системы позволяет получить достоверную оценку напряженно-деформированного состояния при всевозможных изменениях физико-механических характеристик материалов каркаса и основания. Модель позволяет реализовать и возможные включения (слои) в основании с особыми механическими характеристиками. Обозначены пути поиска рациональных конструктивных решений.

Введение. Для исследования НДС вышеназванной системы можно использовать различные программные комплексы: Plaxis 3D, Midas GTS NX, ANSYS, SOFiSTiK, модуль APM Structure3D, входящий в систему APN Civil Engineering и др. В настоящей работе анализ системы «Каркас здания – Свайный фундамент – Основание» выполнен с помощью лидирующей программой системы конечно-элементного анализа Simcenter™ Femap™ with Nastran [1, 2], обладающей одним из самых высокопроизводительных решателей, а также уникальными специализированными демонстрационными панелями для эффективного пре- и постпроцессинга.

Разработка конечно-элементной модели. Получить в результате компьютерного расчета системы «Каркас здания – Свайный фундамент – Основание» достоверные результаты достаточно сложно.

Например, в работе [3] отмечается, что расчеты в программном комплексе Midas GTS NX системы «свая в грунте» для аргиллитоподобных глин выявили завышенные по отношению к натурным испытаниям значения осадки свай (13–24 раза). Расчет методом конечных элементов в программном комплексе Plaxis 3D с использованием модели Hardening Soil показал завышенные значения осадки (до 6 раз) по отношению к стабилизированным осадкам натуральных свай. Использование модели Linear-Elastic для аргиллитоподобных глин при численных расчетах в Plaxis 3D позволяет получить значения осадок близкие к натурным. Однако применение данной модели не в полной мере оправдано для аргиллитоподобной глины

в связи с наличием остаточных деформаций и нелинейным характером осадки сваи при нагружении. Необходима корректировка существующих численных и аналитических методов расчета свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах.

Величина трения зависит от свойств соприкасающихся поверхностей и материалов сваи и грунта. На величину трения влияют, можно предположить, многие не постоянные во времени факторы: особенности погружения сваи в грунт, адгезия, время начала нагружения сваи и длительность этого процесса. Вследствие этого теоретические и экспериментальные результаты анализа НДС исследуемой системы будут отличаться, однако качественная картина НДС, полученная с помощью сертифицированных программных продуктов, оказывается, как правило, верной.

Каркас здания расположен на свайном фундаменте. Свайный куст объединяет пять свай, центральная свая расположена на оси колонны, а остальные – по углам квадрата $2,8 \times 2,8$ м. Сечения сваи квадратное, длина стороны – 0,4 м, длина всех свай одинаковая и равна 6 м. Подошва ростверка размером в плане 6×6 м, толщиной 0,8 м, являющегося вследствие большой жесткости по сути штампом, расположена на поверхности грунта, сопряжение свай с ростверком – жесткое.

Деформируемое основание (грунт) имеет размеры в плане 18×30 м, по высоте –11,2 м. Нижней плоскости основания соответствует отметка $y = -10,0$ м.

Основание является четырехслойным: первый слой имеет толщину 1,2 м, модуль деформации $E = 16$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность материала $\rho = 1760$ кг/м³; второй слой – 1,6 м, $E = 20$ МПа, $\nu = 0,3$, $\rho = 1800$ кг/м³; третий слой – 1,6 м, $E = 30$ МПа, $\nu = 0,3$, $\rho = 1800$ кг/м³; четвертый слой – 5,6 м, $E = 40$ МПа, $\nu = 0,3$, $\rho = 1900$ кг/м³.

Плоскость покрытия находится на отметке 49,2 м, высота каждого этажа равна 4,8 м.

Принятые размеры основания в плане не повлияют неблагоприятно на точность распределения напряжений и деформаций в рассматриваемой системе. Для статических воздействий проблема введения связей конечной жесткости на границах выделенной для расчета ограниченной части грунтового полупространства решена однозначно на основе экспериментальных данных [4].

Для описания железобетонных элементов модели 10-этажного каркаса использованы объемные элементы типа SOLID (твердотельный, пространственный конечный элемент (КЭ) с характерным размером 0,4 м) и линейные (одномерный) элементы типа ROD (Стержень) – для моделирования арматуры. Сечение колонн железобетонного каркаса принято размером 0,4 × 0,4 м неизменным по высоте здания. Ригели перекрытий имеют прямоугольное сечение размером 0,3 × 0,4 м, толщина плит перекрытия – 0,2 м.

Общий вид конечно-элементной модели представлен на рис. 1.

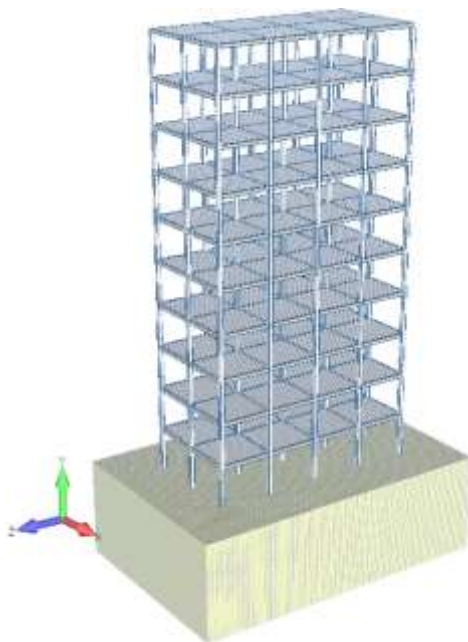


Рис. 1. Общий вид КЭ-модели системы
«Каркас здания – Свайный фундамент – Основание»

Для моделирования элементов каркаса приняты следующие характеристики материалов:

– бетон класса $C^{30}/37$: модуль упругости $E_{cm} = 33 \times 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$, плотность материала $\rho = 2500$ кг/м³; модуль сдвига вычисляется по формуле $G_c = E_{cm} / (2(1 + \nu))$.

– арматура класса S500: модуль упругости $E_s = 2 \times 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, плотность материала $\rho = 7850$ кг/м³; модуль сдвига вычисляется по формуле $G_s = E_s / (2(1 + \nu))$.

Армирование колонны: продольная арматура размещена в каждом углу сечения колонны (площадь сечения арматуры в одном углу равна 491 мм², что соответствует площади стержня $\varnothing = 25$ мм); поперечная арматура в модели отсутствует. Ригели имеют нижнюю и верхнюю рабочую арматуру (площадь сечения каждой соответствует площади 4-х стержней $\varnothing = 20$ мм).

Внешняя вертикальная нагрузка на узлы ригелей по всем этажам принята равной 3 кН, на узлы ригелей покрытия – 1,5 кН. Горизонтальная нагрузка направлена вдоль оси X (вдоль меньшего размера в плане каркаса), нагрузка на узел равна 0,5 кН, приложена ко всем узлам на плоскости XY . Предполагается, что в каждом нагружении заданы расчетные значения нагрузок.

Жесткость контактного взаимодействия сваи и основания сооружения (грунта) является следствием отпора грунта для забиваемых свай и численно определяется по механическим характеристикам грунта.

Связь между узлами КЭ сваи и КЭ основания каркаса моделируется специальным элементом GAP. «При линейном анализе элемент GAP ведет себя как обычная пружина с заданной жесткостью на растяжение и сжатие» [1, 2]. Такой вид взаимодействия напоминает известный в строительной механике метод Б. Н. Жемочкина, с той лишь разницей, что в последнем связь между взаимодействующими объектами осуществляется через абсолютно жесткие связи. Элемент GAP допускает взаимное проскальзывание смежных узлов сваи и грунта.

Сила трения вычисляется по известным из физики соотношениям для силы нормального давления на сваю и коэффициента внутреннего трения (справочная информация). Так как нормальное (горизонтальное) давление по длине сваи для каждого КЭ меняется, меняется не монотонно (большее давление наблюдается для элементов под ростверком, меньшее – на конце сваи), то для уменьшения трудозатрат на этапе подготовки исходной информации к расчету в данной работе принималось осредненное значение давления по всей длине сваи. Следует заметить, что в общем случае элемент GAP используется как нелинейный, предназначенный для модели-

рования зазоров и натягов в контактных задачах. Однако, чтобы реализовать нелинейный расчет требуется быстродействующее вычислительное устройство.

При исследовании контактного взаимодействия сваи и грунта рассматриваются два случая:

1) свая погружается в грунт в заранее подготовленную скважину; плоскости сваи и грунта плотно соприкасаются, но давление грунта на сваю нет; давление грунта на сваю возрастает с увеличением нагрузки на ростверк; это давление на уровне максимальной нагрузки и определяет значение жесткости на сжатие (Compression Stiffness), задаваемой для элемента GAP. Численные значения исследованных параметров в расчете для этого случая приведены в табл. 1 (вариант 1).

2) свая забивается в грунт; сила давления на сваю определяется жесткостью грунтового массива; при определении этой силы следует учитывать наложение деформированных состояний грунта от забивки каждой сваи куста; точное определение давления на каждую сваю невозможно; наиболее нагружена центральная свая; жесткость на сжатие для элемента GAP, соединяющего сваю с грунтом, определяется по известным правилам механики. Численные значения исследованных в расчете параметров для этого случая приведены в табл. 1 (вариант 2).

Результаты конечно-элементного анализа. В табл. 1 приведены выборочные результаты расчета 10-этажного каркаса.

На рис. 2 показано распределение нормальных напряжений σ_x в КЭ грунта по боковой поверхности центральной сваи (вариант 1). Наибольшие (по модулю) напряжения имеют место в КЭ под ростверком и на глубине $y = -4,6$ м.

Качественный характер распределения нормальных (горизонтальных) напряжений σ_x в плоскости XOY показан на рис. 3. На рис. 4 показано распределение нормальных напряжений σ_x в КЭ грунта по боковой поверхности (слева и справа) сваи (вариант 2).

Таблица 1

Результаты анализа 10-этажного каркаса

Выходной вектор результатов, описание	Вариант 1	Вариант 2
1..Total Translation Суммарное перемещение, мм	Max: 134	Max: 56
2..T1 Translation Перемещение в направлении оси X, мм	Min: -28 Max: 7	Min: -12 Max: 2
3..T2 Translation Перемещение в направлении оси Y, мм	Min: -131	Min: -55
3183..Rod Axial Stress Нормальные напряжения в арматуре, МПа	Min: -309.8 Max: 180.7	Min: -257.7 Max: 113.4
3226..Gap X Force Усилия в элементе GAP в направлении оси X, Н	Min: -294.2 Max: 294.2	Min: -0.004 Max: 0.004
3228..Gap Y Shear Force Усилия в элементе GAP в направлении оси Y, Н	Min: -1454 Max: 1437	Min: -0.009 Max: 0.009
3229..Gap Z Shear Force Усилия в элементе GAP в направлении оси Z, Н	Min: -215.5 Max: 215.5	Min: -0.001 Max: 0.002
60011..Solid Y Normal Stress Нормальные напряжения в направлении оси Y в объемном КЭ SOLID, МПа	Min: -36.4 Max: 3.3	Min: -43.0 Max: 2.0
60013..Solid XY Shear Stress Касательные напряжения по площадке, нор- мальной к оси X, в направлении оси Y, МПа	Min: -7.35 Max: 8.24	Min: -5.14 Max: 5.55
60016..Solid Max Prin Stress Максимальные главные напряжения, МПа	Min: -4.61 Max: 13.72	Min: -5.57 Max: 9.31
60017..Solid Min Prin Stress Минимальные главные напряжения, МПа	Min: -36.4 Max: 0.78	Min: -43.0 Max: 0.38
60028..Solid Max Shear Stress Максимальные касательные напряжения, МПа	Min: 0.002 Max: 18.52	Min: 0.0018 Max: 21.84
60031..Solid Von Mises Stress Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа	Min: 0.003 Max: 36.87	Min: 0.01 Max: 43.48

На рис. 5 показано распределение касательных напряжений в КЭ грунта (по модулю) на левой и правой сторонах сваи (вариант 1). Свая расположена по оси колонны ($x = 6$ м, $z = 12$ м), она является центральной в соответствующем кусте свай. Наибольшему значению касательного напряжения σ_{xy} вдоль сваи соответствует отметка $y = -6,0$ м. Распределение касательных напряжений для варианта 2 показано на рис. 6 (плоскость XOY), а качественный характер распределения напряжений – на рис. 7.

Распределение нормальных напряжений σ_y в грунте в плоскости XOY показано на рис. 8, а в плоскости ZOY – на рис. 9.

Предполагая неразрывной связь между узлами КЭ сваи и грунта, получим для варианта 1 максимальное перемещение узла на стыке сваи и грунта равным 71 мм (узел расположен под ростверком).

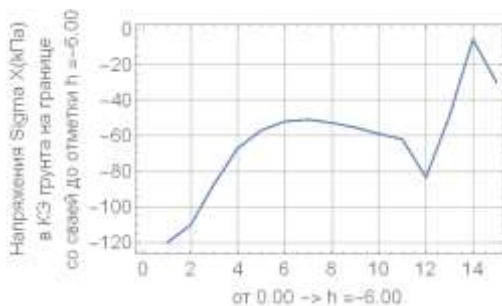


Рис. 2. Напряжения в КЭ грунта

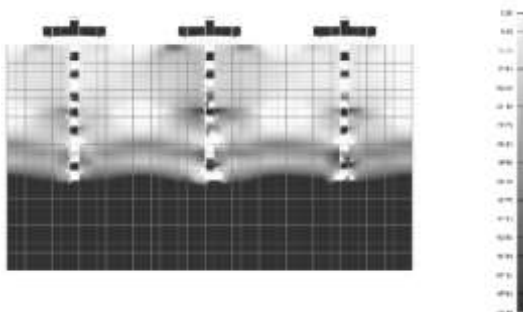


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений σ_x в грунтовом массиве (плоскость XOY)

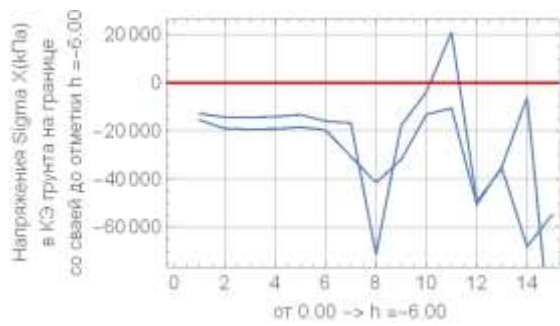


Рис. 4

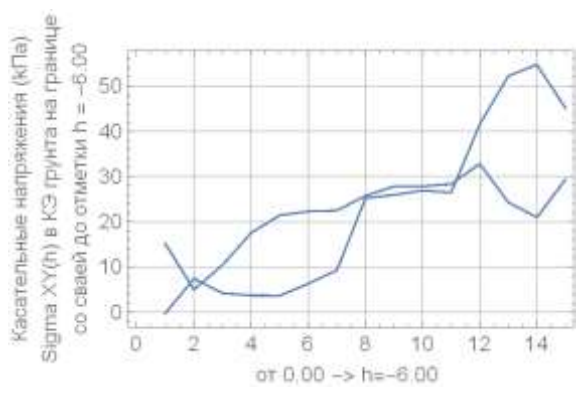


Рис. 5

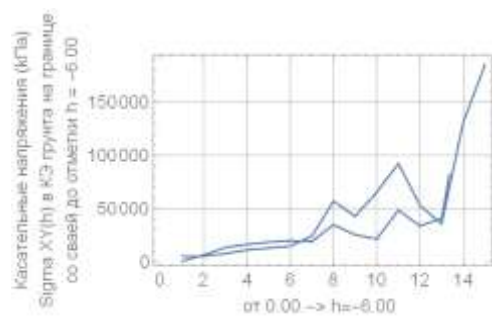


Рис. 6

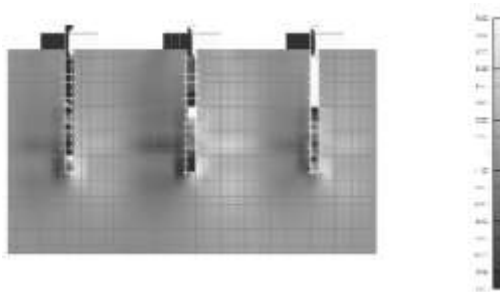


Рис. 7. Распределение касательных напряжений σ_{xy} в грунтовом массиве (плоскость XOY)

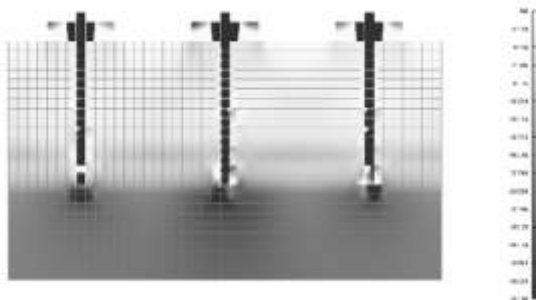


Рис. 8. Распределение вертикальных напряжений σ_y в грунтовом массиве (плоскость XOY)

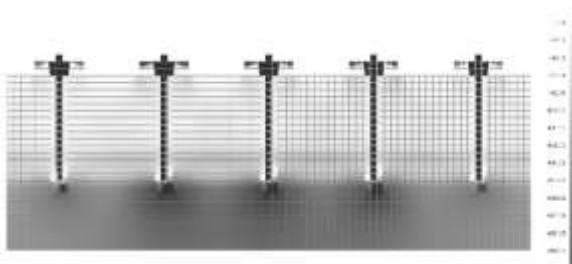


Рис. 9. Распределение вертикальных напряжений σ_y в грунтовом массиве (плоскость ZOY)

Заключение. Разработанная конечно-элементная модель системы «Каркас здания – Свайный фундамент – Основание» позволяет получить достоверную оценку НДС при всевозможных изменениях

физико-механических характеристик материалов каркаса и основания. Модель позволяет реализовать и возможные включения (слои) в основании с особыми механическими характеристиками.

Исследуемая система является многопараметрической. Варьирование параметрами проекта позволит найти экономически целесообразное решение. Для поиска оптимального конструктивного решения можно использовать все возможные методы и способы оптимального проектирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 784 с.
2. Шимкович Д. Г. FEMAP & NASTRAN. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 701 с.
3. Сычкина Е. Н., Антипов В. В., Офрихтер Я. В. Численные исследования работы забивной сваи на аргиллитоподобных глинах. М.: Вестник МГСУ. Том 14. Выпуск 2. 2019. – С. 188–198.
4. Ильичев, В. А., Мангушев, Р. А. и др. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Москва: Изд-во АСВ, 2016. – 1031 с.

УДК 624.04

ОБЗОР ПЛИТ ПОКРЫТИЯ «НА ПРОЛЕТ» И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБУ

ГРИНЁВ В. В., МАДАЛИНСКИЙ Г. Г.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. С 2020 года планируется ввод в учебный процесс кафедры строительные конструкции расчет плит «на пролет» для студентов специальности ПГС. В данной статье рассмотрены отличия в результате расчета плит «на пролет» по нормам, действующим с 1974 года (СССР) и расчета при помощи современного программного комплекса, реализующего общий деформационный метод.