

УДК 539.3+622.83+519.682.6

В. И. Данилов, ГУССТ № 8 при Спецстрое России, Ижевск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СООРУЖЕНИЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ СТРОЕНИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ СО СЛОЖНЫМ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИМ И ТЕРРИТОРИАЛЬНЫМ ЛАНДШАФТНЫМ СОСТОЯНИЕМ

Рассмотрены математическое моделирование и вычислительный эксперимент пространственной структуры сооружения как объективный критерий проектов реконструкции фундаментов и строений, построенных на местности со сложным рельефом. Не всегда самый простой и очевидный способ усиления части основания существующего фундамента будет наименее эффективным. Только моделирование пространственной системы здания, которое учитывает различные виды нагрузок и грунтовых особенностей, позволяет прогнозировать действительный характер осадок и дает возможность предсказать, нужно ли делать усиление и каким образом его осуществлять.

Ключевые слова: пространственная структура сооружения, строительное сооружение, усиление фундамента.

Строительные здания – это объекты длительной эксплуатации, во время которой они подвержены внешнему воздействию (даже тем, что не были ожидаемы во время проектирования, – непроектным воздействиям). К таким воздействиям можно отнести реконструкцию сооружений, пристройки либо встраивание в застройку дополнительных сооружений. Все это ведет к дополнительным эксплуатационным нагрузкам, а также к неравномерным осадкам фундаментов, которые дополняют осадки с момента основного строительства. Неравномерные осадки также бывают обусловлены изменением физико-механических характеристик грунтов, которые залегают под фундаментом, к этому приводят негативные геодинамические процессы: повышение либо понижение уровня грунтовых вод, выход на поверхность карстовых воронок и т. д., а также увлажнение просадочных или набухающих грунтов по причине неправильной технологии при постройке здания либо из-за нарушения правил эксплуатации. Такие воздействия часто вызывают разные варианты деформации здания, трещины и иногда даже разрушения всего сооружения.

Основанием для выполнения работ явилось техническое задание на проверку несущей способности существующего фундамента здания, которое требовалось реконструировать под культовое учреждение.

Здание двухэтажное. Цокольный этаж: размеры в плане 25,96×12,00 м. Усредненная высота стены 1,3 м. Материал наружных стен: керамический кирпич марки 75, толщина 640 мм; плотность 1800 кг/м³.

Была выполнена разборка покрытия и существующих стен первого этажа здания до отметки верха плит цокольного этажа (–0,080 м), и первый этаж требовалось надстроить заново высотой 5,9 м и толщиной стены 640 мм. Материал наружных стен: глиняный кирпич пластического прессования марки 100 по ГОСТ 530-95 на растворе марки 75, плотность 1800 кг/м³. По наружным стенам здания должны быть предусмотрены железобетонные пояса в двух уровнях: на отметке –0,080 и на отметке 4,300.

Существующие фундаменты – ленточные, со ступенчатой схемой заложения относительно высоты и характеризующиеся понижением отметки подошвы в ту сторону, куда уклоняется площадка, из фундаментных блоков (бетон В15), уложенных по монолитным бетонным подушкам на естественном основании (рис. 1). Основание под фундаментом состоит из текучеplastичных и мягкоplastичных глин.

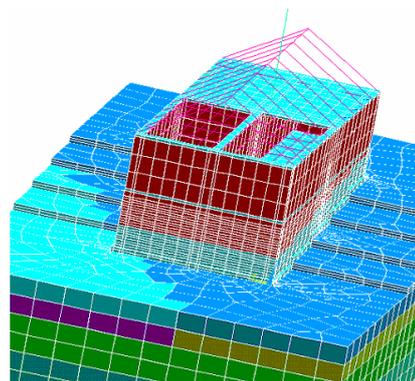


Рис. 1. Схема системы строения, фундамента и грунта

В результате инженерно-технического обследования здания в основании был обнаружен фильтрационный поток, в результате чего локально изменились физико-механические характеристики грунта в части основания. По результатам обследования с использованием традиционных методов расчета было предложено стандартное инженерное решение об усилении части основания существующего фундамента в северном углу здания буронабивными сваями.

Ставилась задача определения осадок и несущей способности фундамента и здания с учетом усиления грунта.

При ее решении мы выделили две подзадачи:

1. Расчет осадок и несущей способности фундамента и здания с учетом усиления грунта буронабивными сваями (характеристики усиленного грунта взяты из отчета по обследованию).

2. То же, но в случае неусиленного грунта.

Конечно-элементная модель [1, 2] системы строения, фундамента и грунта изображена на рис. 1. Различными цветами обозначены разные материалы. Для придания дополнительной жесткости конструкции здания и более точных расчетов была смоделирована конструкция крыши с помощью стержневых элементов.

Были рассмотрены 4 слоя грунта, характеризующиеся различной толщиной с осредненными свойствами, общей толщиной 15 метров, лежащих под нижней поверхностью железобетонного фундамента. Механические свойства бетона, арматуры и кирпичной кладки приведены в табл. 1. Свойства грунтово-

го основания приняты по материалам инженерно-геологических изысканий 2009 года приведены в табл. 2.

В расчете учитывались:

– нагрузки от собственного веса здания, вес конструкций крыши – в виде поверхностной нагрузки 100,78 кг/м² и вес металлического шпилья (517 кг), опирающегося на внутреннюю стену;

– временные нагрузки: ветровая, снеговая и полезная на перекрытия. Нормативные значения средней составляющей ветровой нагрузки, снеговой и полезной нагрузки на перекрытия определялись по формулам СНиП [3].

Таблица 1. Механические свойства бетона, арматуры и кирпичной кладки

Свойства	Начальный модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Расчетное сопротивление растяжению, МПа	Расчетное сопротивление сжатию, МПа	Плотность, кг/м ³
Бетон В10	18	0,22	0,57	0	2400
Бетон В15	23	0,22	0,75	8,5	2400
Кирпичная кладка	6,4	0,25	0,27	2,5	1800
Арматура	200	0,28	365	365	7800

Таблица 2. Механические свойства основания

Номер слоя	Вид грунта	Нормативный модуль деформаций, E ₀ , МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³
1	Глина тугопластичная	2,3	0,42	1950
2	Глина текучепластичная	1,5	0,45	2000
3	Суглинок песчаный	12	0,38	2000
4	Гравийный грунт	18	0,35	2000
5	Аргилитовое основание	38	0,3	2000
6	Суглинок ослабленный	8	0,38	2000

Помимо граничных условий в напряжениях, которые были указаны ранее, также были заданы граничные условия в перемещениях. На гранях массива грунта заданы симметричные граничные условия:

$$u_i(\vec{x}) = 0, \quad \vec{x} \in (\Gamma_1 \cup \Gamma_8 \cup \Gamma_9 \cup \Gamma_{10} \cup \Gamma_{11}); \quad (1)$$

$$\sigma_{ij}(\vec{x})n_j(\vec{x}) = 0 \quad \vec{x} \in (\Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \Gamma_5 \cup \Gamma_6 \cup \Gamma_7), \quad (2)$$

где V – объем системы строения, фундамента и грунта, ограниченный поверхностью Γ ; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений $\hat{\sigma}$; u_i – компоненты вектора перемещения \vec{u} .

Задача определения напряженно-деформированного состояния системы строения, фундамента и грунта решалась методом конечных элементов с использованием нелинейной модели Друккера – Прагера (3) при описании свойств грунта:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \lambda \left(\frac{1}{2\sqrt{I_2(\hat{s})}} s_{ij} + \beta \delta_{ij} \right), \quad (3)$$

где β – константа материала, учитывающая влияние гидростатического давления и определяемая по формуле

$$\beta = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)};$$

φ – коэффициент внутреннего трения грунта;
 $I_2(\hat{s})$ – второй инвариант девиатора напряжений;
 λ – согласующий множитель, определяющий величину деформаций;

s_{ij} – девиаторные составляющие тензоров напряжений;

δ_{ij} – символ Кронекера, определяемый соотношениями

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j, \\ 0 & \text{при } i \neq j. \end{cases}$$

Для дискретизации трехмерных областей (фундамент, основание, конструктивные элементы зданий) применялись объемные 8-узловые конечные элементы первого порядка шести- и пятигранной конфигурации. Оконные проемы не моделировались. Составлена программа построения и расчета системы строения, фундамента и грунта на языке APDL и получены результаты решения – компоненты тензоров напряжений и деформаций. На рис. 2 и 3 показаны вертикальные перемещения системы строения, фундамента и грунта в метрах, полученные при решении первой задачи (с усиленным грунтом).

Максимальная осадка фундамента получилась равной 7,5 см, а разность осадок частей фундамента составила \approx 5 см.

Сравнивая величины полученных осадок с предельными значениями, установленными СНиП [4], имеем:

– максимальная осадка фундамента $s_{\max} = 7,5$ не превышает значения предельной средней осадки 15 см;

– значение относительной разности осадок $\Delta s/L = 6,5/2860 = 0,00227$ не превышает предельной относительной разности осадок 0,0024.

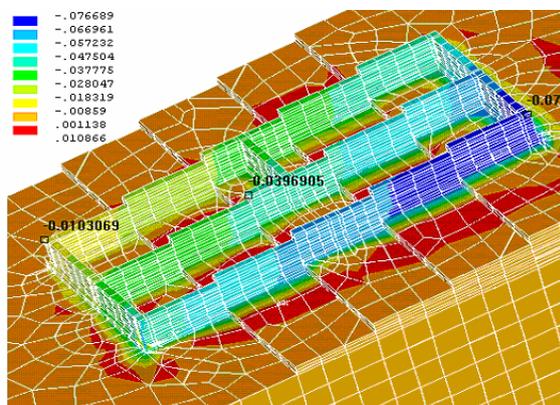


Рис. 2. Осадки здания (укрупненно фундамент)

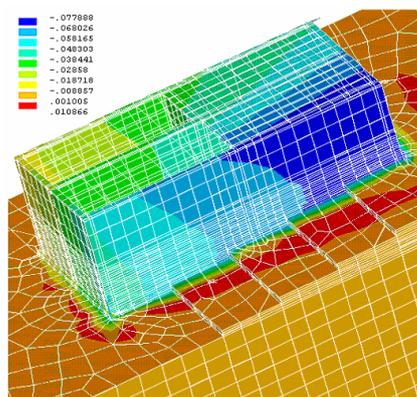


Рис. 3. Схема осадок здания с учетом усиления фундамента

При решении второй задачи, т. е. в случае *неусиленного грунта* результаты получились практически такими же. На рис. 4 показаны вертикальные перемещения системы строения, фундамента и грунта второго случая.

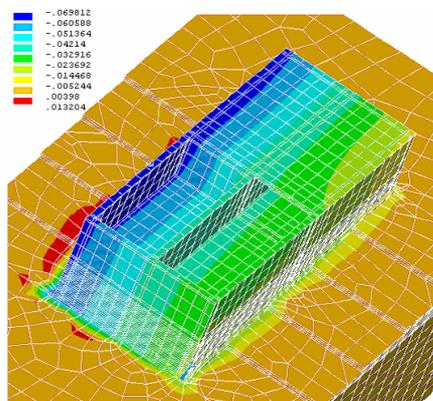


Рис. 4. Значения и характер осадки в случае неусиленного грунта

Осадка фундамента в данном случае изменяется от 0 в самом благополучном месте до 5 см в месте ослабленного грунта. Разность осадок частей фундамента при этом по-прежнему составляет 5 см, но характер осадок уже совершенно иной.

Как показали результаты вычислительных экспериментов, предложенное усиление только одной части здания, не предоставляет необходимого эффекта, так как изменяется только характер осадок, их значение при этом не изменяется. Это происходит из-за своеобразной ступенчатой конструкции фундаментов, которая недостаточна жестка, поэтому сооружение расположено не строго горизонтально. Значит, закрепив сооружение от осадки, а также сползания в нижнем углу, мы становимся инициатором осадки части конструкции, которая находится выше по склону. Сооружение стремится к принятию самого устойчивого положения, а это ведет, с учетом слабых грунтов, к подобному характеру осадок.

То есть далеко не всегда простейший вариант усиления будет самым эффективным. Только моделирование пространственной системы строения, фундамента и грунта, которое принимает во внимание все виды нагрузок и грунтовых особенностей позволяет прогнозировать действительный характер осадок и дает возможность диагностировать, насколько необходимо усиление и каким образом его сделать.

Анализ напряженного состояния конструкций сооружения показал, что в несущих стенах и фундаменте исследуемого здания напряжения не превышают допустимых значений и стены находятся в относительной безопасности. Бетонные пояса усиления практически полностью разгружают стены здания.

Но в грунте (слабосжимаемая текучепластичная глина) в отдельных наиболее опасных местах возникают большие растягивающие напряжения (рис. 5, 6), превышающие несущую способность грунта, и может произойти выпучивание грунта, что, в свою очередь, может привести к разрушению бетонной подготовки пола цокольного этажа. Для восприятия этих напряжений предложено ввести арматурную сетку, что и было реализовано на практике.

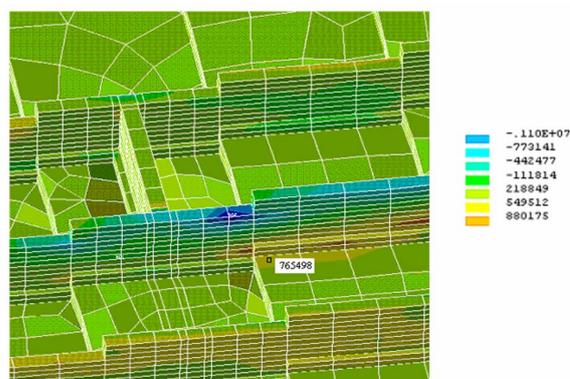


Рис. 5. Напряжения, возникающие в конструкции фундамента и основания по оси x

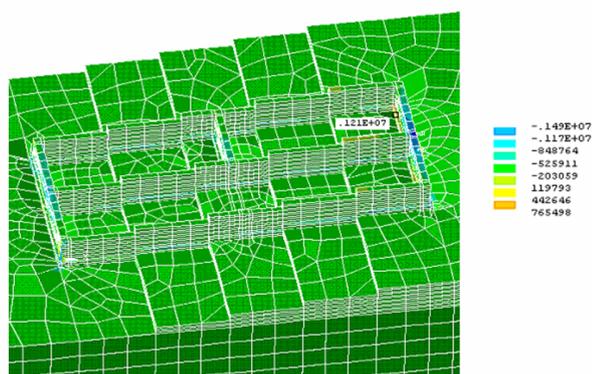


Рис. 6. Напряжения, возникающие в конструкции фундамента и основания по оси y

Следовательно, продемонстрировав с помощью численного анализа использование существующих фундаментов сооружения, подвергнутого реконструкции, которое располагается на площадке с укло-

ном, доказана обязательность применения пространственной модели, а также предложены доказательства решений о возможности реконструкции.

Библиографические ссылки

1. Зубенко В. Л., Емельянова И. В., Емельянов Н. В. Методика применения CAD/CAM/CAE-систем в научных исследованиях // Приволжский научный вестник. – 2013. – № 2(18). – С. 18–23.
2. Елисеев В. Н., Телегина М. В. Особенности моделирования взаимосвязи пространственных данных различного характера // Приволжский научный вестник – 2012. – № 5(9). – С. 13–15.
3. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия. – М. : Стройиздат, 1985.
4. СНиП 2.02.01–83. Основания зданий и сооружений. – М. : Стройиздат, 1985. – 41 с.
5. Самохвалов А. В. Контурное кодирование полутонного изображения: выделение контурной информации на изображении // Приволжский научный вестник. – 2013. – № 7(23). – С. 46–52.

V. I. Danilov, Main department of special construction in Ural region No. 8 of Russia Federal Agency of Special Construction

Mathematical Modeling of Structures in Reconstruction of Buildings Situated in Areas with Complex Hydrogeological and Territorial Landscape States

The article describes the mathematical modeling and numerical experiment of the spatial structure of buildings as an objective criterion of reconstruction projects of foundations and structures built on complex terrains. The easiest and most obvious way to increase the bottom part of the existing foundation is not always the most effective one. Only modeling the spatial system of the building, taking into account various kinds of loads and soil characteristics allows predicting the real character of precipitates and makes it possible to forecast the necessity and way of strengthening.

Key words: spatial structure of building, building construction, strengthening of foundation.