УДК 624.151.2
Мирсаяпов Илизар Талгатович
доктор технических наук, профессор
E-mail: mirsayapov1@mail.ru
Нуриева Дания Мансуровна
кандидат технических наук, доцент
E-mail: danm_n@mail.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1
Шакиров Ильдус Фатихович
генеральный директор
E-mail: fsrshakirov@mail.ru
ООО НППФ «Фундаментспецремонт»
Адрес организации: 420087, Россия, г. Казань, ул. Гвардейская, д. 56

Исследование напряженно-деформированного состояния каркаса многоэтажного административного здания с учетом неравномерного деформирования свайного основания

Аннотация

Постановка задачи. Целью исследования является оценка несущей системы каркаса и плитно-свайного фундамента здания с учетом отклонений в конструкциях здания от проектных параметров и деформирования свайного основания.

Результаты. Выявлены основные закономерности изменения напряженно-деформированного состояния элементов системы «свайное основание – плитный ростверк – многоэтажный железобетонный каркас» вследствие неравномерного деформирования свайного основания.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в установлении влияния имеющихся отклонений от проектных параметров на несущую способность конструкций, оснований и фундаментов здания, результаты исследований могут быть использованы при разработке проектов реконструкции зданий со значительным увеличением нагрузки на существующие несущие конструкции и грунтовое основание.

Ключевые слова: основание, свайно-плитный фундамент, буронабивная свая, несущая способность, монолитный каркас.

Введение

На сегодняшний день свайно-плитные фундаменты являются одной из наиболее эффективных разработок в области фундаментостроения. Они с успехом применяются при проектировании многоэтажных сооружений на площадках с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, поскольку обладают повышенной несущей способностью. Однако в последнее время достаточно часто при устройстве таких фундаментов наблюдаются случаи отклонения от проектных решений, что может привести, несмотря на их высокую распределительную способность, к развитию неравномерных осадок и, как следствие, повреждению надземных конструкций. В таких условиях важным является проведение натурных и численных исследований напряженно-деформированного состояния несущего остова зданий с целью оценки их остаточного ресурса и необходимости реконструкции (усиления).

Исследуемое здание

Исследуемое двенадцатиэтажное административное здание построено в начале 21 столетия, в плане имеет форму квадрата со скошенными углами. Здание выполнено с жесткой каркасной несущей системой из монолитного железобетона, с железобетонными балочными перекрытиями и ядром жесткости, где размещены пассажирские и грузовые лифты. Фундамент здания запроектирован свайно-плитным из железобетонных

буронабивных свай диаметром 800 мм и железобетонного плитного ростверка толщиной 1200 мм. План свайного поля представлен на рис. 1.

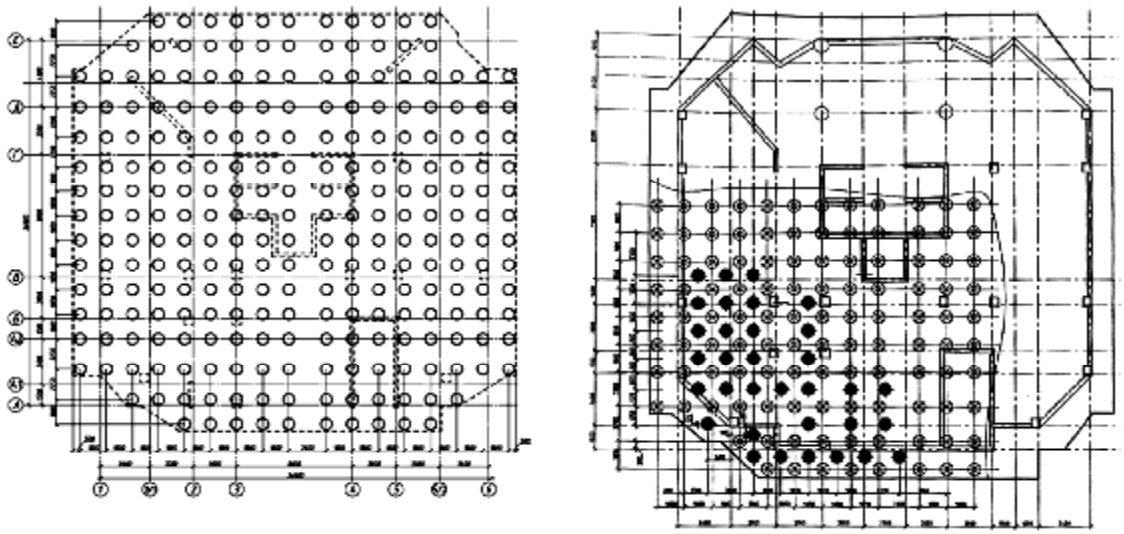


Рис. 1. План свайного поля согласно проектному решению
и схема усиления грунтоцементными сваями (иллюстрация авторов)

Свайно-плитный фундамент при строительстве был выполнен с существенными отклонениями от проекта – под частью здания (в осях 1-4/А-Г) сваи имеют длину 5,4 м вместо проектной 10 м. Устройство свайного поля с указанными отклонениями привело к неравномерному деформированию и осадке грунтового основания, к неравномерному и дополнительному деформированию плитного ростверка, к крену плитного ростверка и здания в целом. Вследствие неравномерного деформирования и крена плитного ростверка в несущих конструкциях здания возникли дополнительные (неучтенные при проектировании) усилия и напряжения, что привело к образованию и развитию трещин в элементах каркаса и к деформированной (непроектной) схеме работы каркаса при эксплуатации. В связи с деформациями и креном здания в направлении коротких свай, появлением в ригелях каркаса трещин из-за нерасчетных растягивающих напряжений, в дальнейшем было выполнено усиление фундаментов в зоне коротких свай грунтоцементными сваями диаметром 600 мм и длиной 10 м (рис. 1).

Усиление свайного основания путем устройства грунтоцементных свай позволило восстановить несущую способность основания до проектных значений. Однако такой подход не позволил устранить дополнительную осадку, кроме этого модуль упругости грунтоцементных свай существенно меньше модуля упругости железобетонных свай, что приводит к возникновению и развитию дополнительных осадок основания, дополнительных перемещений и усилий в несущих конструкциях каркаса и в плитном ростверке. При прогнозе несущей способности и оценке прогнозного остаточного ресурса здания для реконструкции и последующей эксплуатации необходим учет вышеуказанных факторов.

Инженерно-геологические условия строительной площадки

Инженерно-геологические условия площадки рассматриваемого здания характеризуются невыдержанностью по простиранию слоев грунтов по площади и глубине, неоднородностью их состава и состояния. Район изысканий относится к Бугульминско-Белебеевскому возвышенному плато с глубоким эрозионным расчленением. Площадка, где расположено исследуемое здание, расположена в пределах левобережной террасы долины р. Ст. Зай. Согласно результатам инженерно-геологических изысканий, использованных при разработке проекта свайного основания здания, в геологическом строении участка принимают участие аллювиально-делювиальные четвертичные отложения и верхнепермские элювиальные отложения, перекрытые с поверхности толщей техногенных отложений четвертичного возраста

(рис. 2). При изысканиях подземные воды не обнаружены. Геолого-литологическое строение участка включает в себя:

- техногенные насыпные грунты, которые распространены по всей площадке, мощность насыпных грунтов до 1,6 м;
- суглинки от твердой до тугопластичной консистенции мощностью от 2 до 7,5 м, обладающие просадочными свойствами в верхней части разреза;
- глина аргиллитоподобная, твердой консистенции, мощностью до 7,3 м;
- песчаник мелкозернистый, низкой прочности.

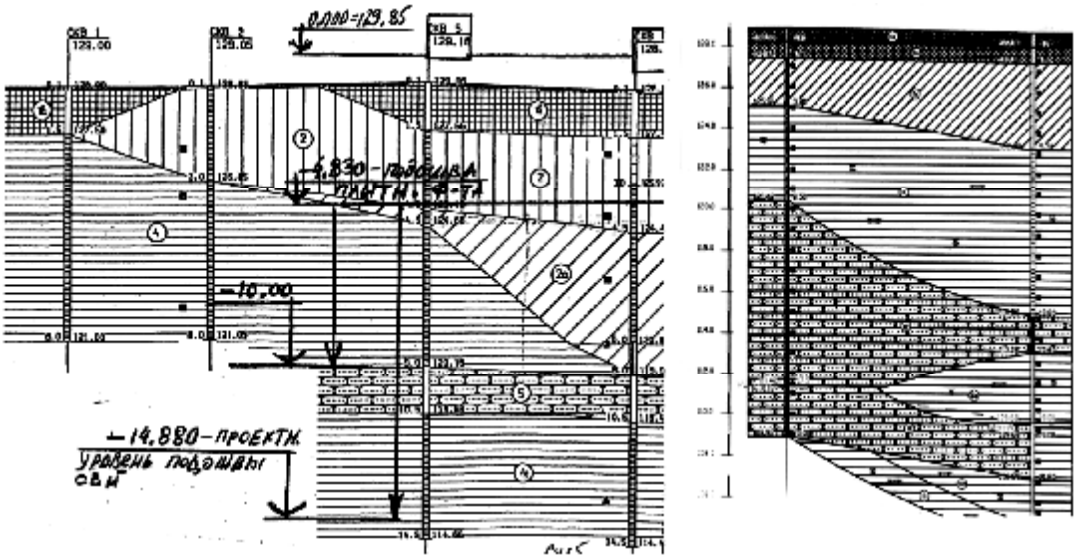


Рис. 2. Инженерно-геологические разрезы 2000 и 2018 годов (иллюстрация авторов)

Изыскания, проведенные в рамках исследования напряженно-деформированного состояния здания в 2018 году, свидетельствуют о повышении влажности и ухудшении состояния грунтов суглинков. При изысканиях выявлены два невыдержанных горизонта подземных вод – в толще четвертичных и верхнепермских отложений. Подземные воды безнапорные, питание водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, восходящей разгрузки подземных вод из нижележащих отложений. Кроме этого, сравнительный анализ результатов проведенных в разные годы изысканий показывает, что глубина расположения слоев грунта, их классификация и характеристики отличаются друг от друга.

Результаты натурного обследования здания

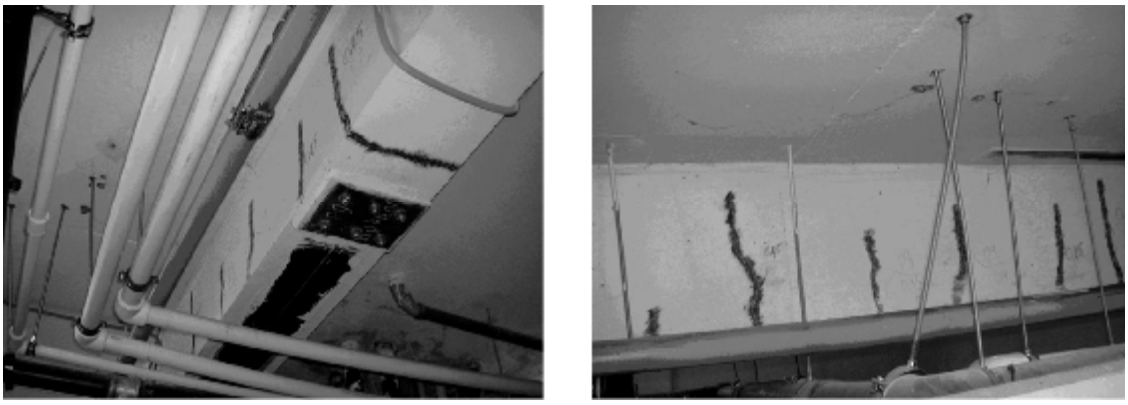
При проведении натурного обследования в 2018 году установлено, что максимальная ширина раскрытия имеющихся в железобетонных балках и плитах междуэтажных перекрытий трещин не увеличилась, однако произошло увеличение ширины раскрытия трещин, имеющих ранее меньшую ширину раскрытия, а также образование новых трещин между уже существующими. Характер развития трещин (рис. 3) свидетельствует об одновременном действии на балки и плиты перекрытий изгибающих моментов и продольных растягивающих усилий в нижних этажах и продольных сжимающих усилий в верхних этажах, вызывающих дополнительное раскрытие трещин. Продолжение развития трещин в несущих элементах перекрытия указывают на продолжающиеся деформации межсвайного грунтового пространства, грунтоцементных свай и осадку свайного основания.

Необходимо отметить, что класс бетона в обследуемых конструкциях здания достаточно высокий. Предел прочности на сжатие соответствует классам В25-В45 (проектный класс бетона В25). Результаты измерения представлены в табл. 1. Контроль прочности проводился методом ударного импульса в соответствии с ГОСТ 22690-88 при помощи электронного ударно-импульсного измерителя прочности ИПС-МГ4.03.

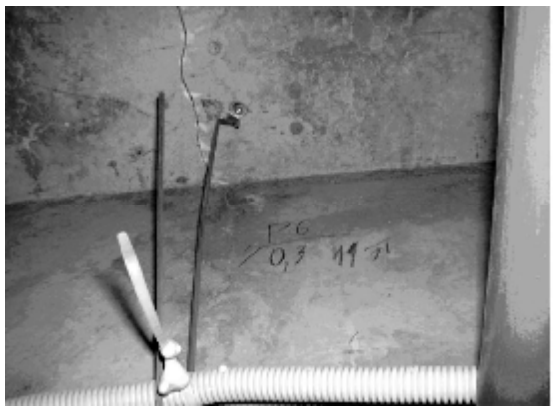
Таблица 1

Результаты измерения прочности бетона железобетонных конструкций на сжатие

№ п.п.	Наименование конструкции	Координаты конструкции	Вид бетона	$\bar{R}$, МПа	Класс бетона
1	Ж/б колонны	подвал, 13 этаж	тяжелый	25,1-31,3	В20-В25
2	Ж/б ригели	подвал, 1-13 этажи	тяжелый	28,9-47,1	В25-В40
3	Ж/б плиты перекрытия	подвал, 1-13 этажи	тяжелый	34,7-52,2	В30-В45
4	Ж/б стены	подвал	тяжелый	24,5-29,2	В20-В25



а)



б) в)

Рис. 3. Трещины: а) в ригелях; б) в плитах перекрытия; в) в стенах (иллюстрация авторов)

Численные исследования напряженно-деформированного состояния каркаса

Для оценки несущей способности системы здания были дополнительно проведены численные исследования с использованием расчетного комплекса ЛИРА-САПР. Как отмечается в работах [1-6] грунтовые основания сооружений, подвергаясь сложному напряженному состоянию, влияют на НДС их надземной конструкции. Поэтому для получения результатов расчета, наиболее точно отражающих реальное поведение здания, необходимо проводить расчет единой системы «свайный фундамент – плитный ростверк – многоэтажный каркас». При вычислениях были созданы две пространственные модели:

- модель 1 – модель каркаса здания в проектном исполнении. На основании данной модели было определено напряженно-деформированное состояние каркаса с последующей проверкой его несущей способности при проектных геометрических и механических характеристиках конструктивных элементов, фундаментов и грунтовых оснований без

учета усиления основания свайного фундамента и наличия дефектов и повреждений в несущих и ограждающих конструкциях при проектных значениях нагрузок на здание;

- модель 2 – модель каркаса здания, отражающая его фактическое состояние на момент проведения исследований. На основании данной модели был произведен расчет конструктивной системы здания с учетом усиления свайного основания, наличия дефектов и повреждений в несущих элементах каркаса.

Разработанные модели представляли собой систему, в которой колонны, балки покрытия и перекрытий моделировались стержневыми элементами; плиты перекрытия, покрытия, стеновое ограждение из железобетона – оболочечными элементами, плита ростверка – элементами толстой оболочки. Расчетная модель каркаса представлена на рис. 4. Наличие дефектов и трещин в конструкциях производилось путем введения в расчет пониженного модуля деформации бетона [7], определяемого в соответствии с СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции». Работа свай моделировалась с помощью системы податливых элементов (связей), жесткость которых принималась в зависимости от деформационных характеристик грунтового основания и параметров свай. Расчет жесткости податливых связей производилась исходя из формулы [8-10]:

$$K=P/s_G, \quad (1)$$

где P – нагрузка на сваю, s_G – осадка сваи от нагрузки P, принимаемая с учетом влияния соседних свай согласно СП 52-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов»: $s_G=R_s s_1$ (R_s – коэффициент увеличения осадки; s_1 – осадка одиночной сваи). Вычисление жесткости податливых связей производилось для трех типов свай:

- БНС 10-80 – проектная буронабивная свая длиной 10 м и диаметром 800 мм;
- БНС 5.4-80 – буронабивная свая непроектной длины (5,4 м) и диаметром 800 мм;
- ГЦС 10-60 – грунтоцементная свая усиления длиной 10 м и диаметром 600 мм.

Результаты вычислений сведены в табл. 2. Жесткость сваи непроектной длины (5,4 м) составила 6343,48 кН, что на 35 % ниже жесткости проектной сваи (10 м). Учитывая наличие под плитой ростверка просадочного суглинка (ИГЭ-2) и возможность образования зазора на контакте между плитой и грунтом основания при замачивании последнего, вся нагрузка от здания в моделях передавалась на сваи.

Таблица 2

Сводная таблица расчета свай

Тип сваи	*БНС 10-80*	*БНС 5.4-80*	*ЦГС 10-60*
Несущая способность сваи Fd, кН	1412,762	922,842	897,303
Допустимая нагрузка на сваю Nd, кН	1009,116	659,173	640,935
Осадка сваи S_G, м	0,103	0,104	0,0621
Жесткость податливой связи, моделирующей работу сваи К, кН/м	9726,606	6343,48	10305,6

Расчет производился на действие постоянных и временных нагрузок в соответствии со сводами правил СП 20.13330.2016, СП 14.133302014. Для учета этапа усиления был использован модуль «Монтаж», встроенный в структуру программы ЛИРА-САПР. Дополнительно на языке С+ были написаны программы, позволяющие произвести оценку несущей способности каркаса с учетом ветровых и сейсмических воздействий. Результаты расчетов представлены в табл. 3-7 и на рис. 4.

Таблица 3

Сводная таблица расчетных нагрузок на сваи (с учетом усиленного основания)

Модель	В сваях проектной длины (10 м)			В сваях не проектной длины (5,4 м)		
	Доп. нагрузка N_d, кН	N_{max}, кН	N_{min}, кН	Доп. нагрузка N_d, кН	N_{max}, кН	N_{min}, кН
Модель 1	1009,116	986,7	533,1	659,173	-	-
Модель 2		809,8	655,3		514,1	383,6

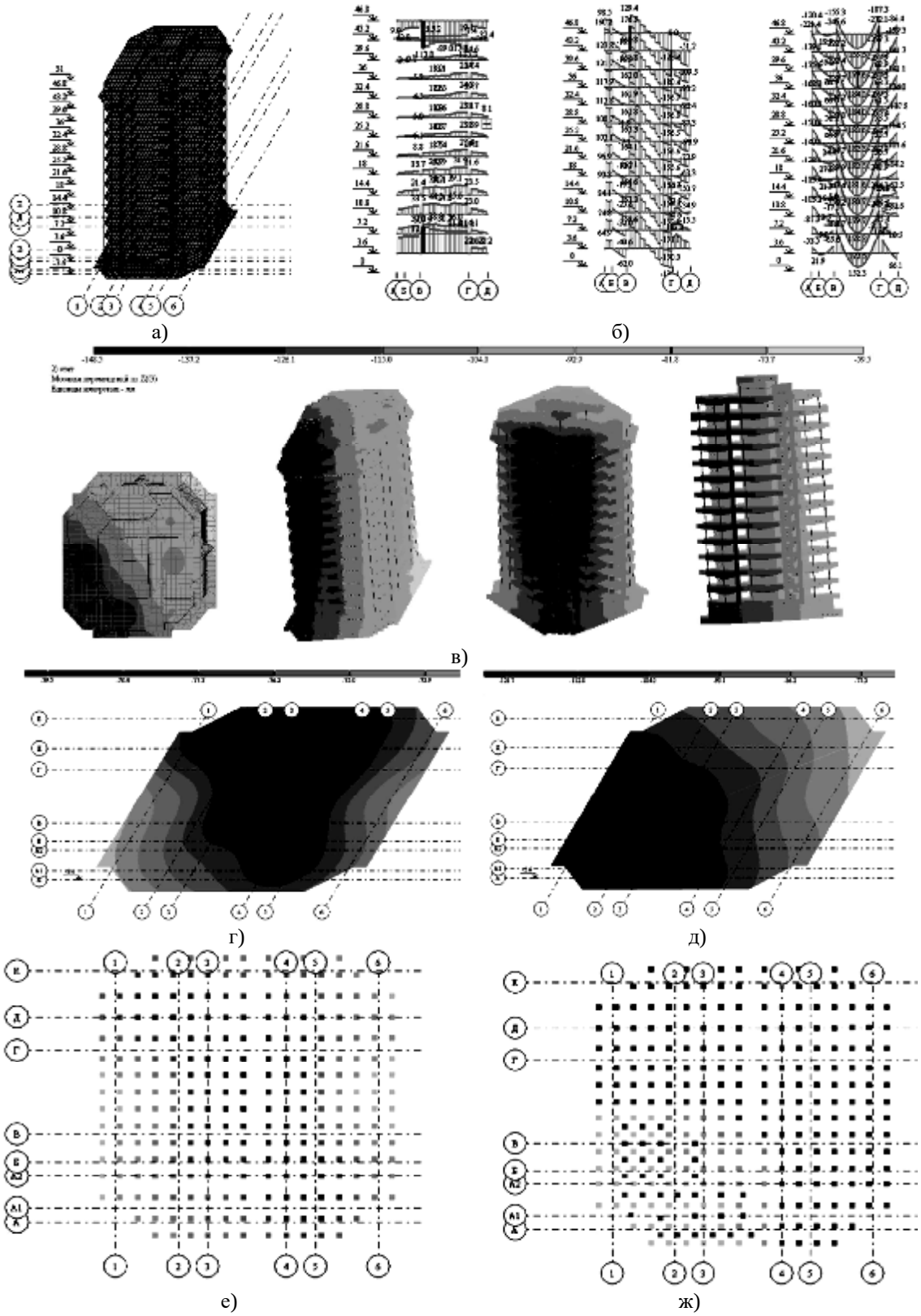


Рис. 4. Результаты расчета: а) пространственная расчетная модель каркаса;
б) характер распределения усилий N, Q, M в балках сечением 300×800 по высоте здания
при действии статических нагрузок (модель 2);
в) деформированное состояние каркаса при действии статических нагрузок (модель 2);
г), д) деформированное состояние плиты ростверка
в проектном (модель 1) и фактическом (модель 2) состоянии;
е) мозаика распределения нагрузок на сваи в модели 1;
ж) то же – в модели 2 (иллюстрация авторов)

Таблица 4

Коэффициенты использования прочности свай

Тип сваи	БНС 10-80 (проектная)		БНС 5.4-80 (непроектная)	
Допустимая нагрузка на сваю N_d, кН	1009,116		659,173	
Вариант	Проектное исполнение	Фактическое состояние с учетом усиления	Проектное исполнение	Фактическое состояние с учетом усиления
Максимальное усилие в свае N_{max}, кН	986,7	809,8	-	514,1
Коэффициент использования прочности $K = N_{max}/N_d$	0,977	0,802	-	0,78

Таблица 5

Расчетные осадки

Модель	Max осадка, мм	Max осадка, мм	Средняя осадка, мм	Крен
Проектное состояние (модель 1)	80,7	71,6	76,15	0,00024
Фактическое состояние (модель 2)	130,7	59,5	95,1	0,00019
Предельно допустимые значения (СП 22.13330.2011)	-	-	150,0	0,003

Таблица 6

Коэффициенты использования прочности колонн

№ этажа	Проектное исполнение (модель 1)		Фактическое состояние (модель 2)	
	K_{max}	K_{min}	K_{max}	K_{min}
1 этаж	0,886	0,379	0,972	0,449
7 этаж	0,589	0,383	0,652	0,372
13 этаж	0,885	0,120	0,901	0,144

Таблица 7

Коэффициент использования прочности наиболее нагруженных балок перекрытий

№ этажа	Балки сечением 300×500 мм				Балки сечением 300×800 мм			
	Проектное исполнение (модель 1)		Фактическое состояние (модель 2)		Проектное исполнение (модель 1)		Фактическое состояние (модель 2)	
	опора	пролет	опора	пролет	опора	пролет	опора	пролет
1 эт.	0,862	0,986	0,859	0,982	0,862	0,986	0,859	0,982
7 эт.	0,74	0,921	0,733	0,987	0,74	0,921	0,733	0,987
13 эт.	0,588	0,931	0,667	0,987	0,588	0,931	0,667	0,987

Основные выводы

Проведенные численные исследования системы «свайное основание – плитный ростверк – многоэтажный каркас» с учетом совместного деформирования всех элементов системы позволили установить закономерности изменения напряженно-деформированного состояния всех элементов системы во время длительной эксплуатации. Основной причиной нестационарного деформирования элементов железобетонного каркаса, плиты ростверка и свайного основания, является наличие зоны со сваями непроектной длины, и снижение жесткости основания в этой зоне на 35 %. Вследствие чего происходит перераспределение усилий между свайным основанием и

железобетонными элементами каркаса и возникают непроектные дополнительные усилия в элементах междуэтажных перекрытий и колоннах, а также увеличивается крен здания. В монолитных железобетонных элементах перекрытия помимо изгибающих моментов возникают продольные растягивающие и сжимающие напряжения, что подтверждается образованием новых и развитием существующих нормальных и наклонных трещин в этих элементах.

Несмотря на вышеизложенные процессы, происходящие в элементах системы «свайное основание – плитный ростверк – надземная часть здания», несущая способность плитно-свайного фундамента, вертикальных и горизонтальных несущих элементов каркаса достаточна для восприятия действующих эксплуатационных нагрузок. Осадки и крены плитно-свайного фундамента находятся в пределах, допустимых нормами проектирования.

Заключение

Основной причиной изменения напряженно-деформированного состояния и увеличения усилий в несущих элементах каркаса здания, а также увеличения осадок и крена плитно-свайного фундамента является наличие зоны со сваями непроектной длины и, как следствие, снижение жесткости свайного основания в этой зоне на 35 %.

Список библиографических ссылок

1. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Прогнозирование деформаций оснований фундаментов с учетом длительного нелинейного деформирования грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. № 4. С. 16–23.
2. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Experimental and theoretical studies of bearing capacity and deformation of reinforced soil foundations under cyclic loading : Proc. intern. symp., Kyoto, Japan – Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics / Balkema. Lieden, 2014. P. 742–747.
3. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases : Proc. intern. symp., Seoul, Korea – Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / Balkema. Lieden, 2014. P. 401–404.
4. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Strength and deformability of clay soil under different triaxial load regimes that consider crack formation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. Vol. 53. Iss. 1. P. 5–11.
5. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Calculation models of bearing capacity and deformation of soil foundations with vertical elements reinforced under cyclic loading : Proc. intern. symp., Seoul, Korea – ICSMGE 2017 – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2017, September. P. 2599–2602.
6. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Long-term Settlements Assessment of High-rise Building Groundbase Based on Analytical Ground Deformation Diagram : Proc. intern. symp., St.Petersbug; Russian Federation – ACUUS 2016 – 15th International Scientific Conference 'Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development', Vol. 165, 2016. P. 519–527.
7. Страхов Д. Е. Исследование воздействия аварийных факторов на пространственный каркас здания // Инновационная наука. 2016. № 11-2. С. 67–70.
8. Галиуллин Р. Р., Изотов В. С., Нуриева Д. М. Применение результатов численных исследований для оценки динамических характеристик здания с железобетонным каркасом // Актуальные вопросы развития науки. Сборник статей международной научно-практической конференции. Уфа : Башкирский Государственный ун-т, 2014. С. 32–38.
9. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. Киев : Факт, 2005. 344 с.
10. Городецкий А. С., Батрак Л. Г., Городецкий Д. А., Лазнюк М. В., Юсипенко С. В. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона. Киев : Факт, 2004. 106 с.

Mirsayapov Ilizar Talgatovich
doctor of technical sciences, professor
E-mail: mirsayapov@kgasu.ru
Nurieva Daniya Mansurovna
candidate of technical sciences, associate professor
E-mail: danm_n@mail.ru
Kazan State University of Architecture and Engineering
The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1
Shakirov Ildus Fatihovich
general director
E-mail: fsrshakirov@mail.ru
LLC «Fundamentspecremont»
The organization address: 420087, Russia, Kazan, Gvardeiskaya st., 56

The researches of the stress-strain state of the multi-storey administrative building frame with taking into account the pile foundations uneven deformation

Abstract

Problem statement. The researches purpose is to evaluate bearing capacity of the building frame system and plate-pile foundation with taking into account the deviations in the building constructions from the design parameters and the pile base deformation.

Results. Identified the main stress-strain state change regularities in the stress-strain state of the system elements «pile-base – plate grillage – multi-storey reinforced concrete frame» due to uneven deformation of pile groundbase.

Conclusions. The obtained results for construction industry significance consists in determining the existing deviations influence from the design parameters on the building constructions, groundbases and foundations bearing capacity. The researches results can be used in the reconstruction projects development for buildings with a significant load increase on the existing load-bearing constructions and groundbases.

Keywords: groundbase, pile-plate foundation, bored pile, bearing capacity, monolithic frame.

References

1. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Prediction of deformation of the foundation with the long-term non-linear deformation of soil // Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov. 2011. № 4. P. 16–23.
2. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Experimental and theoretical studies of bearing capacity and deformation of reinforced soil foundations under cyclic loading : Proc. intern. symp., Kyoto, Japan – Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics / Balkema. Lieden, 2014. P. 742–747.
3. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases : Proc. intern. symp., Seoul, Korea – Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / Balkema. Lieden, 2014. P. 401–404.
4. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Strength and deformability of clay soil under different triaxial load regimes that consider crack formation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. Vol. 53. Iss. 1. P. 5–11.
5. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Calculation models of bearing capacity and deformation of soil foundations with vertical elements reinforced under cyclic loading: Proc. intern. symp., Seoul, Korea – ICSMGE 2017 – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2017, September. P. 2599–2602.
6. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Long-term Settlements Assessment of High-rise Building Groundbase Based on Analytical Ground Deformation Diagram : Proc. intern.

symp. SPb. Russian Federation – ACUUS 2016 – 15th International Scientific Conference 'Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development'. Vol. 165, 2016. P. 519–527.
7. Strahov D. E. The study of the impact of emergency factors on the spatial framework of the building // Innovatsionnaya nauka. 2016. № 11-2. P. 67–70.
8. Galiullin R. R., Izotov V. S., Nurieva D. M. Application of the results of numerical studies to assess the dynamic characteristics of a building with a reinforced concrete frame // Actual problems of the development of science. Collection of articles of the international scientific-practical conference. Ufa : Bashkir State University, 2014. P. 32–38.
9. Gorodetsky A. S., Evzerov I. D. Computer models of structures. Kiev : Fact, 2005. 344 p.
10. Gorodetsky A. S., Batrak L. G., Gorodetsky D. A., Laznyuk M. V., Yusipenko S. V. Calculation and design of structures of high-rise buildings from monolithic reinforced concrete. Kiev : Fact, 2004. 106 p.