УДК 624.154

Н.З. Готман, Д.А. Давлетяров, М.З. Каюмов

Институт «БашНИИстрой», Уфа, Россия

ОПЫТ УСИЛЕНИЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ (БИС)

В статье анализируются опытные и расчетные данные усиления свайных кустовых фундаментов буроинъекционными сваями, полученные при проектировании и строительстве торгово-развлекательного комплекса в г. Уфе. Дано краткое описание объекта, метода усиления и методики расчета. Приводится сопоставление данных статического испытания буроинъекционной сваи с результатами расчетов по СНиП и МКЭ.

Ключевые слова: буроинъекционная свая (БИС), усиление фундаментов, расчет БИС, метод конечных элементов.

N.Z. Gotman, D.A. Davletyarov, M.Z. Kayumov

Scientific-Research Institute «BashNIISTroy», Ufa, Russian Federation

EXPERIENCE OF STRENGTHENING OF PILE FOUNDATIONS WITH USE OF JET GROUTED PILES

The paper analyses experimental and design data of pile group foundations strengthening with jet grouted piles. The above data are received while design and construction of shopping center in Ufa city. The short description of the object, method of strengthening and design method are given. Data of jet grouted piles CPT test are compared to design results according to SNIP and finite element method.

Keywords: jet grouted pile, foundation strengthening, jet grouted pile design, finite element method.

Описание объекта, методы усиления фундаментов

Усиление фундаментов выполнено для строящегося здания торгового комплекса в г. Уфе. Здание торгового комплекса представляет собой многоэтажное многопролетное строение с двумя подземными этажами (паркингами). Общие размеры комплекса здания в плане составляют 69,15×239,48 м (рис. 1).

Конструктивное решение здания разработано в каркасно-монолитном варианте и разделено на 5 температурно-деформационных блоков. Из-за естественного рельефа площадки отметка нижнего уров-

ния здания переменная, в связи с этим глубина подземной части здания изменяется от 0 до 11 м.

Фундаменты выполнены свайными с монолитным ростверком (кустовые) под колонны и свайными с ленточным монолитным ростверком под стены.

Рис. 1. Общий вид строящегося здания

Сваи – забивные квадратного сечения 30×30 см. Согласно инженерно-геологическим изысканиям сваи прорезают слои насыпных грунтов, мягко- и тугопластичных суглинков и заглублены от 1 до 3 м в глины твердые и полутвердые. В связи с неоднородностью основания, как в плане, так и по глубине, длина свай изменяется от 4 до 17 м.

Работы на площадке строительства здания торгового комплекса были начаты в 2007 г. В 2008 г. работы по строительству здания были приостановлены.

В 2012 г. была разработана новая архитектурная концепция и принято решение продолжить строительство. На этот момент были выполнены все фундаменты и 3 этажа здания.

В связи с новой архитектурной концепцией и новым объемно-планировочным решением Институт БашНИИСтрой разработал рабочую документацию, предусматривающую усиление свайных кустовых фундаментов под колонны каркаса, нагрузка на которые возросла по сравнению с первоначальным проектом в 1,2–2 раза.

Усиление фундаментов выполнено 3 способами, что определяется в зависимости от разницы между расчетными нагрузками на фундаменты в соответствии с новым объемно-планировочным решением и максимальными допускаемыми нагрузками на фактически выполненные фундаменты, а именно:

- при увеличении новой проектной нагрузки до 300 кН – путем укрепления основания под подошвой ростверков напорной цементацией через неизвлекаемые иньекторы;

- при увеличении новой проектной нагрузки от 300 до 500 кН – путем уширения ростверка и укрепления основания под его подошвой напорной цементацией через неизвлекаемые иньекторы;

- при увеличении новой проектной нагрузки свыше 500 кН – путем устройства дополнительных буроинъекционных свай (БИС) и передачи на них нагрузки через ростверк, бетонируемый непосредственно под существующим ростверком.

Буроинъекционные сваи приняты диаметром 425 мм, длиной 13 и 12 м. Особенностью технического решения усиления фундаментов сваями БИС явилось то, что дополнительный фундамент на сваях БИС, устраиваемый под ростверком выполненного фундамента (рис. 2), включается в работу по мере исчерпания несущей способности забивных свай усиливаемого фундамента. При этом схема работы ростверков выполненного (усиливаемого) фундамента не изменяется, поэтому железобетонные выполненные ростверки не требуют усиления.

а

б

Рис. 2. Усиление свайного фундамента буроинъекционными сваями (БИС):
а – армирование ростверка нового фундамента на сваях БИС
под существующим ростверком; *б* – усиленный фундамент

При проектировании фундамента усиления БИС производился совместный расчет выполненного (усиливаемого) фундамента и допол-

нительного фундамента со сваями БИС. В результате совместного расчета определены нагрузки на буроинъекционные сваи. Несущая способность буроинъекционных свай рассчитана по СНиП, а для оценки жесткости свай выполнено математическое моделирование нагружения свай осевой силой. Ниже изложены некоторые результаты выполненных расчетов и сопоставление их с данными статического испытания свай [2].

Расчет нагрузок, передаваемых на БИС усиления

Расчеты нагрузок, передаваемых на буроинъекционные сваи усиления, выполнены с использованием программного комплекса SCAD, реализующего расчет конструкций методом конечного элемента. Монолитные ростверки усиления моделировались элементами «оболочка», сваи – стержнями со связями конечной жесткости на конце (рис. 3). Соединение существующего фундамента с фундаментом усиления выполнено объединением перемещений по направлению Z [3].

Рис. 3. Расчетная схема усиления существующего фундамента

Расчеты выполнялись на полные эксплуатационные нагрузки.

Определение коэффициента жесткости свай выполнено по результатам численного моделирования работы и существующих свай и буроинъекционных свай усиления в программном комплексе PLAXIS.

По результатам выполненных расчетов подбиралось необходимое количество буроинъекционных свай усиления из условия, что расчетная нагрузка, передаваемая на существующие забивные и буроинъекционные сваи усиления, не превышала их несущих способностей соответственно.

Расчет несущей способности БИС и сопоставление с данными статических испытаний

По данным отчета об инженерно-геологических изысканиях, в основании участка выделено 4 инженерно-геологических элемента (рис. 4): ИГЭ 1 – насыпной грунт; ИГЭ 2 – глина тугопластичная; ИГЭ 3 – глина твердая; ИГЭ 4 – мергель выветрелый.

Рис. 4. Инженерно-геологический разрез участка

Рис. 5. Расчетная схема БИС в осесимметричной постановке

В табл. 1 приведены физико-механические характеристики выделенных инженерно-геологических элементов.

Таблица 1

Физико-механические характеристики ИГЭ

Номер ИГЭ	Плотность грунта, кН/м ³	Угол внутреннего трения, град.	Удельное сцепление, кПа	Модуль деформации, МПа
1	18,9	8	13	12
2	19,5	9	35	13
3	20	17	29	15
4	19,84	15	30	11

Несущая способность буронагнеточных свай определялась тремя способами – расчетом по СНиП 24.1333/2011, методом конечных элементов (МКЭ) и при испытании сваи статической вдавливающей нагрузкой. Ниже приведены результаты расчетов для сваи длиной 13 м в месте с наибольшей мощностью насыпных грунтов.

В результате расчета по СНиП несущая способность сваи оказалась равной 630 кН, расчетно-допускаемая нагрузка на сваю равна 450 кН.

Определение несущей способности свай выполнено по результатам численного моделирования работы сваи в программном комплексе PLAXIS 2D v.2012. Расчет напряженно-деформированного состояния основания велся по упругопластической модели Мора-Кулона. Расчеты выполнялись в осесимметричной постановке. Размер расчетной области равен 5×30 м (рис. 5).

Поэтапное нагружение сваи моделировалось увеличением приложенной нагрузки на сваю на 80 кН (как при испытании сваи статической вдавливающей нагрузкой). Главными отслеживаемыми параметрами результатов являются величина приложенной нагрузки и осадка головы сваи. В результате расчета построены графики «нагрузка-осадка» сваи (см. рис. 6).

В результате расчета МКЭ несущая способность сваи оказалась равной 610 кН, расчетно-допускаемая нагрузка на сваю равна 440 кН.

Испытание статической вдавливающей нагрузкой выполнено через 3 месяца после бетонирования сваи. При испытании сваи статической вдавливающей нагрузкой несущая способность сваи оказалась равной 470 кН, расчетно-допускаемая нагрузка на сваю равна 390 кН.

На рис. 6 приведены графики «нагрузка-осадка» при испытании сваи статической вдавливающей нагрузкой и при расчете сваи МКЭ. В табл. 2 отражены результаты расчета несущей способности и расчетно-допускаемой нагрузки на сваю всеми тремя способами.

Рис. 6. График «нагрузка-осадка сваи»: 1 – при испытании сваи статической вдавливающей нагрузкой, 2 – при расчете сваи МКЭ

Таблица 2

Результаты расчета

Расчет	Несущая способность, кН	Расчетно-допускаемая нагрузка, кН
СНиП	630	450
МКЭ	610	440
Статическое вдавливание	470	390

Как видно из табл. 2, результаты расчета по СНиП и МКЭ очень близки, тогда как при испытании сваи статической нагрузкой расчетно-допускаемая нагрузка оказалась несколько ниже. Такое расхождение можно объяснить сложными инженерно-геологическими условиями, а именно наличием большой мощности насыпных грунтов и резким изменением этой мощности в плане, что привело к несоот-

ветствию расчетной мощности и фактической. Поэтому в условиях неоднородного залегания насыпных грунтов при проектировании усиления БИС необходимо ориентироваться на максимальную мощность насыпных грунтов в пределах расчетного участка и назначать дополнительные изыскания, позволяющие более точно определить характер изменения насыпи [1].

Библиографический список

1. Простов С.М., Герасимов О.В., Мальцев Е.А. Электромагнитный геоконтроль процессов укрепления грунтов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2007. – 211 с.
2. Готман Н.З., Готман А.Л. Опыт усиления фундаментов строящегося здания торгового комплекса в г. Уфе // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2011. – № 3. – С. 2–7.
3. Готман Н.З., Шапиро Д.М., Гузеев Р. Численная имитация статического испытания тензометрических свай // Труды 3-й Украинской науч.-техн. конф. по механике грунтов и фундаментостроению. – Киев, 2000.

References

1. Prostov S.M., Gerasimov O.V., Maltsev E.A. Elektromagnitnyj geokontrol protsessov ukrepleniya gruntov [Electromagnetic geocontrol soil improvement processes]. Tomskiy gosudarstvennyy universitet, 2007. 211 s.
2. Gotman N.Z., Gotman A.L. Opyt usileniya fundamentov stroyashchegosya zdaniya torgovogo kompleksa v g. Ufe [Experience to strengthen the foundations of the building under construction shopping center in Ufa]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2011, no. 3, pp. 2-7.
3. Gotman N.Z., Shapiro D.M., Guzeev R. Chislennaya imitatsiia staticheskogo ispytaniia tenzometricheskikh svaj [Numerical simulation of static strain test piles]. *Trudy 3 Ukrainskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po mekhanike gruntov i fundamentostroeniyu*, Kiev, 2000.

Об авторах

Готман Наталья Залмановна (Уфа, Россия) – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Основания и фундаменты» института «БашНИИСтрой»; e-mail: lsf_ps@mail.ru

Давлетяров Динар Анфисович (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, заведующий лабораторией моделирования несущих конструкций института «БашНИИСтрой»; e-mail: lsf_ps@mail.ru

Каюмов Марат Закиевич (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела «Основания и фундаменты» института «БашНИИСтрой»; e-mail: lsf_ps@mail.ru

About the authors

Gotman Natalya Zalmanovna (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of Bases and Foundations Department, Institute «BashNIISTroy»; e-mail: lsf_ps@mail.ru

Davletyarov Dinar Anfisovich (Ufa, Russian Federation) – Ph.D in Technical Sciences, Cand.Techn.Sc. Head of laboratory of modeling of load-bearing constructions, Institute «BashNIISTroy»; e-mail: lsf_ps@mail.ru

Kayumov Marat Zakievich (Ufa, Russian Federation) – Ph.D in Technical Sciences, employee of Bases and Foundations Department, Institute «BashNIISTroy»; e-mail: lsf_ps@mail.ru

Получено 01.04.2014