УДК 624.138.9

А.Н. Алехин¹, А.А. Алехин²

¹Уральский государственный университет путей сообщения,
Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА ИСКУССТВЕННОЙ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В СЛОЕ СЛАБОГО ГРУНТА ОСНОВАНИЯ МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ В ЕКАТЕРИНБУРГЕ

В статье описан один из вариантов устройства геотехногенного массива, позволившего существенно улучшить и выровнять свойства естественного основания многоэтажного здания. Благодаря тщательному учету в расчетах и проекте особенностей залегания и свойств грунтов основания были существенно снижены затраты на возведение геотехнической части сооружения при одновременном повышении ее эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: слабое грунтовое основание, многоэтажное здание, искусственная геотехническая структура.

A.N. Alekhin¹, A.A. Alekhin²

¹Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russian Federation

²Ural Federal University, named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

FEATURES OF CREATING AN ARTIFICIAL GEOTECHNICAL STRUCTURE WITHIN WEAK LAYER OF THE SOIL BASE OF A MULTISTORY BUILDING IN YEKATERINBURG

The article describes one of the variants of creating an artificial geotechnical structure that made it possible to significantly improve the properties of soil base of the multistory building. Through paying special attention to features of location and properties of soils was significantly reduced cost for the construction of the geotechnical structure, while increasing its operational reliability.

Keywords: weak soil base, multistory building, artificial geotechnical structure.

Одной из причин возведения фундаментов глубокого заложения является недостаточная несущая способность и повышенная деформа-

тивность верхних слоев грунтовой толщи, что не позволяет установить на них достаточно тяжелые современные здания. В этом случае нередко применяются глубокие буронабивные сваи большого диаметра, 600–800 мм, прорезывающие слои с недостаточно надежными геотехническими свойствами. При этом сваи выполняют роль несущих элементов, а поэтому их проектные надежность и работоспособность (в том числе равномерность и однородность деформаций пятна застройки), особенно для сложных тяжелых сооружений при наличии неоднородного напластования грунтов, должны быть, безусловно, обеспечены. Однако в условиях современных производственно-экономических отношений, когда основным критерием менеджмента в строительстве является, по сути, часто необоснованная с технической точки зрения и промышленной безопасности объектов экономия средств безотносительно к качеству и безопасности строительства, выполнить эти условия при более или менее сложных технологических процессах, характерных для современной эффективной геотехники, практически невозможно. Во-первых, проектирование и возведение геотехнических частей зданий, в том числе и достаточно сложных в изготовлении глубоких буровых свай, выполняют обычно разные организации, к тому же, как правило, не имеющие в своем штате квалифицированных инженеров-геотехников. Во-вторых, что на первый взгляд не кажется очевидным, но тем не менее при отсутствии пока в нашей стране системы страхования объектов капитального строительства контроль качества выполнения строительных работ, особенно скрытых, и прежде всего геотехнических, очень проблематичен и часто формален. Не случайно поэтому в ряде стран существуют геотехнические центры или фирмы, задачей которых является как раз осуществление всего комплекса геотехнических работ на объекте: от исследования грунтов площадки до геотехнического проектирования и возведения геотехнической части сооружения. Такая сквозная технология, очевидно, в наибольшей степени обеспечивает необходимое качество именно этих специфических работ, при наилучшем учете и использовании специфики грунтовой среды. Очевидно также, что при отсутствии ответственного и заинтересованного в качестве строительства страхового бизнеса, о чем говорилось выше, реализация такой технологии у нас в стране пока вряд ли возможна или по крайней мере чрезвычайно сложна. А вот в случае надземных частей и конструкций

зданий, а также их инженерного оборудования дело обстоит с точностью наоборот. Здесь, если речь, конечно, не идет о сложных случаях реконструкции, усиления или восстановления зданий, как раз для снижения затрат требуется разумная стандартизация процессов, поскольку возведение и монтаж надземных конструкций более доступен контролю и надзору, а главное – в нем не участвует уникальная для каждой строительной площадки инженерно-геологическая ситуация. Резюме: процесс проектирования и возведения геотехнической (подземной) части сооружений индивидуален, а надземной части индустриален. В конце концов, насколько надежна будет опора, т.е. фундамент, настолько надежно будет и установленное на него сооружение или конструкция.

Есть еще один аспект, затрудняющий контроль качества глубоких буровых свай большого диаметра. Согласно нормативным документам при проектировании зданий и сооружений нормального и повышенного уровня ответственности рекомендуется выполнять статические испытания натуральных свай, особенно если они опираются на нескальные грунты, т.е. не относятся к категории свай-стоек, поскольку в этом случае трудно, а точнее практически невозможно контролировать качество основания и боковой поверхности свай. При этом сами испытания таких свай весьма дороги и технически сложны. Именно это обстоятельство говорит в пользу того, что этот сложный вид работ от проектирования до изготовления свай или других геотехнических элементов должна выполнять одна организация (одно юридическое лицо), полностью отвечающее за конечный результат. Именно об этом и о трудности реализации такой технологии в условиях современной технической политики в строительстве шла речь выше.

В то же время инженерно-геологические условия различных строительных площадок весьма разнообразны, что позволяет разрабатывать и применять различные решения устройства оснований и фундаментов, часто весьма индивидуальные и даже нестандартные, а при технически грамотном подходе еще и весьма эффективные, т.е. надежные и оптимальные по цене. Не случайно, поэтому все нормы, справочники и методические пособия рекомендуют, а нормы даже требуют при решении геотехнических вопросов рассматривать несколько вариантов, и чем больше этих вариантов будет рассмотрено, тем эффективнее будет принятое решение и тем меньше будет геотехнических оши-

бок – об этом свидетельствует практика. К сожалению, проектировщики эти требования в последнее время часто игнорируют. Индивидуальный же учет инженерно-геологических, а по сути, инженерно-геотехнических особенностей площадки позволяет, например, использовать более контролируемые технические решения для оснований и фундаментов.

Одним из таких конкурентных способов замены буронабивных свай в качестве фундаментов и при этом нередко поддающихся более простому контролю является «геотехнический массив» – термин, предложенный профессором Б.Н. Мельниковым (Екатеринбург) в 1976 г. Сам автор [1] определяет понятие геомассива следующим образом: «Геотехнический массив (геомассив) – это система природных и техногенных образований, создаваемая в основании инженерного сооружения путем включения в природный массив грунта и на его поверхность техногенных элементов (уплотненных или закрепленных зон и слоев, бетонных и грунтоцементных блоков, плит и т.д.). Такая комплексная система формирует единую пространственную структуру с высокой распределительной несущей способностью». Фактически этот метод представляет собой комплекс мероприятий по улучшению и выравниванию свойств основания, т.е. созданию искусственного основания и обеспечению совместной с ним работы геотехнической части сооружения. Эффективность техногенного улучшения оснований, т.е. использования «геомассивов», доказана уже достаточно обширной практикой их применения.

Например, на сайте ОАО «НБЮ ГРАУНД» в Интернете приводится пример возведения восьмизэтажного жилого здания с подземной парковкой в условиях сложившейся застройки центральной части города Перми. Глубина подземной части здания составляет около 5 м. В основании фундаментной монолитной железобетонной плиты здания залегают грунты с низкими и, самое главное, неоднородными деформационными свойствами. Использование таких грунтов в качестве основания приводит к развитию неравномерных деформаций по пятну застройки, что, в свою очередь, отражается на увеличении конструктивных размеров и армирования основных несущих элементов здания. Для улучшения прочностных и выравнивания деформационных характеристик основания было выполнено его искусственное улучшение путем формирования геомассива, представляющего собой природный

грунт, армированный жесткими грунтоцементными элементами (ГЦЭ), с уложенной поверху распределительной подушкой толщиной 500 мм из уплотненного щебня фракции 40–70 мм. Технология устройства грунтоцементных элементов основана на использовании энергии высоконапорной струи цементного раствора для перемешивания природного грунта с частичным его замещением цементным раствором. Получаемый при этом проектный модуль деформации геомассива $E_{гр}^{экв}$ должен был составить не менее 40 МПа. Приведенный модуль деформаций искусственного основания («геомассива») в таком случае определяется по «методу смеси» на основе теории композитных материалов. При этом в качестве матрицы рассматривается естественный грунт с его природными характеристиками. Расчет приведенного модуля деформации выполняется по формуле

$$E_{гр}^{экв} = \left[\frac{E_{гр}(A_{гр} - \sum A_{арм}) + E_{арм} \sum A_{арм}}{A_{гр}} \right]. \quad (1)$$

Здесь $E_{гр}$ – модуль деформации армируемого грунта; $E_{арм}$ – модуль деформации армирующего элемента; $A_{гр}$ – площадь армируемого грунта; $A_{арм}$ – площадь армирующих элементов;

В описываемом случае мощность слабых грунтов (это суглинки и глины вплоть до текучей консистенции) составила порядка 10 м. Далее согласно приведенному на сайте техническому описанию, диаметр грунтоцементных элементов составлял 1,2 м. При расположении их в плане – по сетке 3,0×3,0 м расстояние «в свету» между элементами составляло 0,6 м. При указанной на сайте мощности геомассива (также около 10 м) такая конструкция фактически заменила природный грунт слоем грунтоцемента и, наверное, не вполне соответствует понятию «композита», определяемого формулой (1), которая была использована, например, профессором В.В. Лушниковым при рассмотрении взаимодействия массивов грунта с буроинъекционными. Однако, возможно, в этих грунтовых условиях такой вид геомассива был наиболее эффективным.

Несколько иной вариант геомассива был разработан для сооружения многоэтажного административно-парковочного комплекса с торговыми помещениями по улице Вилонова в городе Екатеринбурге. На рис. 1 изображен общий вид этого здания, состоящего из двух модулей: административно-торговой части и парковочного комплекса.

Площадка строительства образована смыкающимися старыми руслами и надпойменными террасами рек Ольховки и Основинки, являющихся левобережными малыми притоками реки Исети, которые огибают с двух сторон Основинскую возвышенность ее коренного берега. Такая морфологически-гидрологическая система обусловила достаточно характерное для Среднего Урала залегание грунтов – по элювиальной коре выветривания мезозойского, а иногда и четвертичного возраста залегают склоновые отложения (делювий и пролювий), в толще которых расположены слабые аллювиальные или озерно-болотные грунты.

Рис. 1. Общий вид многоэтажного административно-парковочного комплекса по улице Вилонова в городе Екатеринбурге

Рис. 2. Характерный геологический разрез площадки

Именно эти грунты придают основаниям крупных, сложных в плане и, как правило, тяжелых сооружений неустойчивость и неоднородную сжимаемость. Один из характерных геологических разрезов площадки приведен на рис. 2.

Цифрами 3, 4, 5 на разрезе обозначены слабые аллювиальные, в основном глинистые грунты. Грунты под номерами 6 и 7 – это элювиальная кора выветривания, ниже которой на глубинах 10–11 м расположена полускальная трещиноватая непрочная кровля материнской породы серпентинита. Исходя из инженерно-геологических условий площадки в качестве армирующих основание элементов были использованы короткие буронабивные бетонные сваи (свайные армирующие элементы – СВЭ) диаметром 600 мм. Эти сваи-элементы не являются несущими, а только армируют аллювиальные грунты для повышения их жесткости. Поэтому для лучшего сцепления бетона с грунтом на большей части своей длины они выполнены без арматуры и с неровными боковыми поверхностями, что, естественно, упростило технологию и контроль их возведения. И только в верхней части свайных элементов установлена арматура, перевязываемая с арматурой фундаментной плиты (рис. 3).

Рис. 3. Устройство армирующих бетонных элементов геомассива

Получаемый элемент обладает средними качествами между грунтоцементным элементом, который выполнять сложнее, и свайей, выполнять которую проще и технологичнее. Таким образом, выполнять такие элементы было проще, чем грунтоцементные, а по жесткости и сцеплению с окружающим грунтом они равноценны.

Эквивалентный модуль деформации армированного основания определяется также по формуле (1) и зависит от частоты размещения армирующих элементов, их деформативности и деформативности окружающего грунта. В нашем случае размещение свай подбиралось таким образом, чтобы значение эквивалентного модуля на всех участках основания многоэтажного здания в плане составляло около 20 МПа, что примерно соответствует модулю деформации элювиальных дресвянистых и сапролитных грунтов. Модуль деформации армирующего элемента по данным испытаний образцов грунтобетона составил 1550 МПа. При этом среднее значение коэффициента постели C_z по расчетам на различных участках площадки после армирования составило в среднем 4500 кН/м^3 против примерно 3000 кН/м^3 – до армирования. Общее количество армирующих бетонных элементов диаметром 600 мм на площадке составило 220 шт. при средней длине элементов 4,0–4,5 м против 400 буронабивных железобетонных свай диаметром 1,2 м и большей глубины по первоначально разработанному с помощью программы «ЛИРА» проекту. Поверх армирующих элементов расположен еще один необходимый элемент геомассива – щебеночная подушка толщиной 600 мм, которая способствует выравниванию давления по подошве фундаментной плиты и обеспечению средней осадки плиты на различных участках в пределах 5–6 см.

Тщательные расчеты, в том числе с учетом полевых значений нелинейных параметров грунта [2], что, кстати, полностью согласуется с п.12.5.4 СП 50-101-2004, позволили определить коэффициенты постели на различных участках пятна застройки и соответственно необходимое количество армирующих элементов. Ниже приведен фрагмент таблицы с расчетными значениями коэффициентов постели, а на рис. 4 один из участков основания здания с размещением армирующих элементов.

Фрагмент таблицы с расчетными значениями коэффициентов постели геомассива

Зона скважины	Коэффициент постели		Расчетная осадка, см		Несущая способность армирующей сваи по СП 50-102-2003
	до арм.	после арм.	до арм.	после арм.	
1а	3900	5000	5,1	4,0	303 кН (30,3 тс)
2а	3200	4800	6,3	4,2	303 кН (30,3 тс)
3а	5400	6700	3,7	3,0	303 кН (30,3 тс)
1	2500	3300	8,0	6,1	405 кН (40,5 тс)
2	2850	4080	7,0	4,9	610 кН (61,0 тс)
3	3000	4650	6,7	4,3	390 кН (39,0 тс)
4	2780	4300	7,2	4,7	450 кН (45,0 тс)
5	2500	4000	8,0	5,0	450 кН (45,0 тс)

Рис. 4. Участок основания здания с размещением армирующих элементов

При общей внешней простоте описанного выше технического решения оно потребовало тщательных расчетов с применением в том числе современных нелинейных грунтовых моделей. Примерная общая стоимость возведения геотехнической части объекта с армированием слабого грунта основания по предложенному решению составила около

70 млн рублей против примерно 200 млн рублей по первоначально предложенному стандартному варианту плитно-свайного фундамента.

Выводы

1. Ввиду уникальности грунта как среды и уникальности инженерно-геологических условий каждой строительной площадки единый, стандартный подход к проектированию и возведению геотехнических частей сложных и тяжелых сооружений, как правило, приводит к неэкономичным, а нередко и опасным решениям.

2. Учет же индивидуальных особенностей инженерно-геологических условий и тщательный расчет деформационных параметров основания на основе правильно выполненных исследований позволяет не только обеспечить надежность геотехнической части сооружения, но и в несколько раз снизить затраты по ее возведению.

Библиографический список

1. Мельников Б.Н., Нестеров А.И., Осипов В.И. Геотехногенные массивы как новый вид оснований инженерных сооружений // Инженерная геология. – 1985. – № 2. – С. 11–21.

2. Алехин А.Н., Алехин А.А. Определение параметров нелинейной модели грунта по данным полевых испытаний // Геотехнические проблемы мегаполисов: тр. международной конференции по геотехнике. – М., 2010 – С. 1201–1208.

References

1. Mel'nikov B.N., Nesterov A.I., Osipov V.I. Geotekhnogennyye massivy kak novyy vid osnovanii inzhenernykh sooruzhenii [Geotechnologia mass as a new type of the bases engineering structures]. *Inzhenernaya geologiya*, 1985, no. 2, pp. 11-21.

2. Alekhin A.N., Alekhin A.A. Opredelenie parametrov nelineinoy modeli grunta po dannym polevykh ispytaniy [Definition of parameters of a nonlinear model of a ground according to a field test]. *Trudy mezhdunarodnoi konferentsii po geotekhnike «Geotekhnicheskie problemy megapolisov»*, Moscow, 2010, pp. 1201–1208.

Об авторах

Алехин Алексей Николаевич (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты и транспортные тоннели» Уральского государственного университета путей сообщений; e-mail: alekhin.51@gmail.com.

Алехин Андрей Алексеевич (Екатеринбург, Россия) – ассистент кафедры «Основания и фундаменты» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: alekhin.andrey@gmail.com

About the authors

Alekhin Alexey Nikolayevich (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of bridges and tunnels, Ural State University of Railway Transport; e-mail: alekhin.51@gmail.com

Alekhin Andrey Alexeyevich (Yekaterinburg, Russian Federation) – Assistant Lecturer, Department of substructures and foundation, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: alekhin.andrey@gmail.com

Получено 24.03.2014