

УДК 624.131

С.С. ЗУЕВ, зам. ген. директора (s.zuev@inbox.ru), ОАО «НьюГраунд» (Пермь);
О.А. МАКОВЕЦКИЙ, канд. техн. наук (oleg-mak@inbox.ru),
И.И. ХУСАИНОВ, инженер (ihi888@mail.ru.),
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Применение струйной цементации для устройства подземных частей комплексов

На основе метода улучшения геотехнического основания, закрепленного струйной цементацией, выбрана наиболее простая, приближенная к реальности адекватная математическая модель для расчета. Определены оптимальные параметры технологического процесса для обеспечения гарантированного диаметра jet-элемента не менее 1200 мм.

Ключевые слова: jet-grouting, деформация оснований, геомассив.

Струйная геотехнология, известная как Jet-grouting method, имеет существенное отличие от других строительных технологий благодаря используемым в ней специфическим механическим процессам. С помощью данной технологии возможно выполнять различные технические задачи: закрепление грунтов на месте их залегания; устройство подземных несущих конструкций и противофильтрационных завес.

Применение струйной цементации грунта позволяет выполнить однородное грунтовое основание с проектируемыми физико-механическими характеристиками, обеспечивающее высокую эксплуатационную надежность. При этом по сравнению с традиционными проектными решениями (применением буронабивных свай) сокращаются сроки проведения работ и снижается стоимость подготовки основания.

Применение этой технологии для строительства крупных спортивных сооружений – стадионов выполнялось на объектах в России и Европе.

Одним из таких примеров является строительство нового стадиона футбольного клуба «Краснодар». Размеры стадиона в плане 230,5×90,4 м, высота 28,8 м, подземная часть глубиной 8,3 м. Несущие конструкции – монолитный железобетонный каркас с ядрами жесткости; фундамент – монолитная железобетонная плита. Предельные величины осадок фундаментов 15 см. Уровень ответственности сооружения повышенный.

Площадка строительства расположена в Краснодаре по ул. Восточно-Кругликовской. Рельеф участка строительства относительно ровный. Абсолютные отметки поверхности земли колеблются от 27,2 до 28,4 м.

В пределах изученной в ходе инженерно-геологических изысканий толщи грунтов (до глубины 40 м) выделено семь инженерно-геологических элементов: ИГЭ-1 – суглинок твердый, просадочный (модуль деформации $E=12,4$ МПа); ИГЭ-2 – суглинок полутвердый ($E=16,5$ МПа); ИГЭ-3 – песок пылеватый, плотный ($E=28$ МПа); ИГЭ-4 – глина полутвердая ($E=14,9$ МПа); ИГЭ-5 – суглинок тугопластичный ($E=12$ МПа); ИГЭ-6 – песок средней крупности, плотный ($E=34$ МПа); ИГЭ-7 – песок гравелистый, плотный ($E=41$ МПа).

Гидрогеологические условия площадки изысканий характеризуются наличием двух водоносных горизонтов подземных вод. Первый горизонт подземных вод установился на глубине 2,2–3,2 м, циркулирует в эолово-делювиальных суглинках, и аллювиальных песках. Второй водоносный горизонт подземных вод вскрыт на глубине 15–17,5 м и устанавливается на глубине 7,4–9,2 м от поверхности земли. Этот горизонт циркулирует в аллювиальных песках средней крупности и гравелистых, суглинках и глинах, горизонт напорный, развит ниже водоупорных глин.

В соответствии с рекомендациями по применению карт ОСР-97 спор-

тивные сооружения относятся к объектам повышенной ответственности, сейсмичность которых определяется по карте ОСР-97В. Сейсмичность площадки по карте ОСР-97В в соответствии с грунтовыми условиями составляет 8 баллов.

Изучение инженерно-геологических условий площадки и научно-технического отчета по сейсмичности участка показывает, что основной проблемой площадки является возможность виброразжижения и виброползучести слоя плотных пылеватых песков ИГЭ-3, а также высокая пористость слоя бурых глин ИГЭ-4 при воздействии землетрясения силой 8 баллов.

На этапе анализа документации по возведению стадиона выявлены следующие основные особенности его конструктивной схемы: существенная

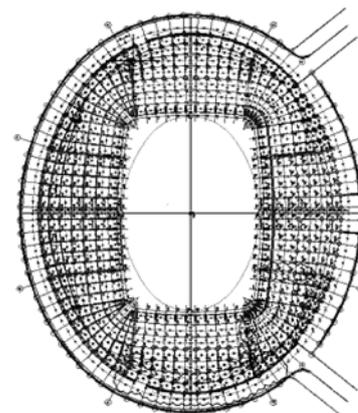


Рис. 1. Схема закрепления основания

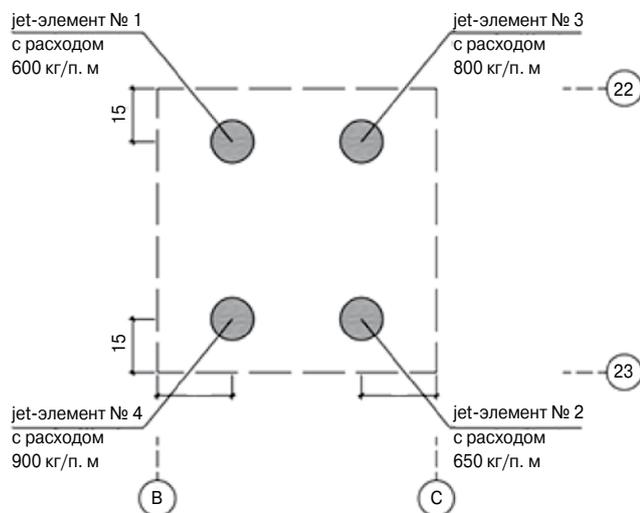


Рис. 2. Схема и общий вид опытной площадки

неоднородность нагрузок, передаваемых на основание, и то, что допустимая разница осадок между блоками стадиона должна составлять не более 2,5 см.

Таким образом, необходимость закрепления основания обусловлена потенциальной возможностью вибро-разжижения и виброползучести слоев ИГЭ-3 и ИГЭ-4, а также необходимостью обеспечения жесткостных характеристик основания, отвечающих требованиям, предъявляемым к конструкциям стадиона по относительной разности осадок.

Рассматривались два варианта обеспечения эксплуатационной надежности основания фундаментной плиты в условиях сейсмических воздействий:

- устройство свайного основания из буронабивных элементов длиной 15–20 м;
- закрепление слоев ИГЭ-3 (водонасыщенные пески) и ИГЭ-4 (полутвердые глины) по технологии струйной цементации.

Вариант применения струйной цементации грунта является более предпочтительным. Устройством закрепления по регулярной сетке по всему пятну фундаментной плиты достигается большая однородность и сейсмическая жесткость, чем в случае применения локальных (в местах расположения несущих элементов) железобетонных свайных элементов.

Улучшение физико-механических характеристик грунта основания выполнено по методу геомассива с устройством в основании плиты грун-

тоцементных армирующих элементов диаметром 1,3–1,5 м с шагом осей 2,5–2,8 м. В этом случае грунтоцементные элементы работают в едином массиве с окружающим грунтом, под всей поверхностью плиты и не рассматриваются как свайный элемент, передающий острием нагрузку на нижележащие слои. Физико-механические характеристики грунтоцементного элемента: плотность материала 23–25 кН/м³; расчетное сопротивление сжатию $R=3,5–4$ МПа; модуль деформации $E=1,5–3,5$ ГПа.

Приведенные деформативные характеристики такого геомассива становятся значительно более высокими и достигают значений: модуль общих деформаций $E=60–80$ МПа по сравнению с природными значениями 15–25 МПа. Технология производства работ по струйной цементации грунта позволяет контролировать зоны уплотнения основания и модифицировать его свойства на оптимальную глубину [1].

Другой задачей армирования основания является повышение его сейсмической жесткости.

Устройство регулярной сетки армирующих элементов с более высокой по отношению к естественному грунту скоростью прохождения поперечной сейсмической волны (V_s) приводит к тому, что в них рассеивается значительная часть энергии сейсмической волны и ее воздействие на грунт, защищенный элементами, становится минимальным.

В соответствии с анализом за «средний» грунт приняты грунты, пред-

ставленные суглинистыми отложениями, характеризующимися для верхней десятиметровой толщи следующими средними параметрами: плотность $\rho_c=1,95$ т/м³; скорость распространения поперечных волн $V_s=250$ м/с; коэффициент крепости по М.М. Протодьяконову $f_{крс}=0,75$.

Расчеты приращений $\Delta J_{ж}$ по средним значениям сейсмических жесткостей ($V \cdot \rho$) для верхней десятиметровой толщи выполнены в соответствии с зависимостью С.В. Медведева (Г.Н. Назаров, В.А. Шемшурин. «Использование инженерно-геологических характеристик при сейсмическом микрорайонировании. Сейсмическое микрорайонирование». М.: Наука, 1977):

$$\Delta J_{ж} = 1,67g (V_c \cdot \rho_c / V_n \cdot \rho_n),$$

где $V_c \cdot \rho_c$ – сейсмическая жесткость «среднего» грунта; $V_n \cdot \rho_n$ – сейсмическая жесткость грунта в исследуемом пункте.

Величины скоростей V_s определены по значениям $f_{кр}$ по графикам, которые представляют собой детализированные для исследуемого района фрагменты, позволяющие определить скорости упругих волн в грунтовых слоях по геологическим данным (значения коэффициента крепости, глубина залегания, обводненность и плотность или степень трещиноватости).

Приращения сейсмичности, обусловленные обводненностью в грунте $\Delta J_{в}$ на глубинах h до 10 м ($\Delta J_{в}$), определялись по зависимости С.В. Медведева:

$$\Delta J_B = e^{-0,04h} \cdot \kappa,$$

где h – глубина уровня грунтовых вод;
 κ – понижающий коэффициент для
твердых, полутвердых и тугопластич-
ных глин и суглинков и крупнообло-
мочных грунтов, принимаемый 0,5.

Были определены значения скоро-
стей V_s для различных инженерно-
геологических элементов. По вели-
чинам V_s и ρ рассчитаны приращения
сейсмичности, обусловленные сей-
смической жесткостью грунтов $\Delta J_{ж}$, а
также их обводненностью ΔJ_B . По этим
данным определены расчетные значе-
ния сейсмичности $J_{расч}$ изменяющиеся
от 8,1 до 8,2 балла, и уточненный балл
 $J_{уточ} = 8$.

Также был выполнен расчет про-
гнозируемой сейсмичности для кон-
струкций стадиона, фундамент кото-
рых будет размещаться на грунтах за-
крепленной толщи, представленной
ИГЭ-3 мощностью 4 м, ИГЭ-4 мощ-
ностью 3 м и ИГЭ-5 мощностью 3 м.
При этом прогнозируемая расчетная
сейсмичность определяется равной
8,1 балла, а уточненная – 8 баллам.

На прогнозируемой глубине устра-
иваются армирующие элементы со
значениями $V_s \approx 400$ м/с и $\rho \approx 2100$ кг/м³.
В этом случае приращения сейсмич-
ности за счет увеличения приведен-
ной жесткости грунтов окажутся отри-
цательными, ($J_{ж} \approx -0,5$ балла). Таким об-
разом, устройство армирования осно-
вания может привести к некоторому
снижению сейсмического воздействия
на сооружение.

Вместе с тем устройство таких
вертикальных армирующих элементов
приводит к эффекту обжатия грунта и
ограничению возможности и абсолют-
ной величины его объемных дефор-
маций при воздействии сейсмической
волны. В этих условиях не возникает
явлений «виброразжижения» и «виб-
роуплотнения».

Таким образом, устройство грун-
тоцементных армирующих элемен-
тов значительно повышает эксплуа-
ционную надежность основания за
счет повышения его деформацион-
ных характеристик и активной защи-
ты грунтов от воздействия сейсмиче-
ских колебаний и обеспечивает без-
опасную эксплуатацию спортивного
сооружения.

Мероприятия по уменьшению де-
формаций оснований и влияния их на
сооружения регламентируются требо-
ваниями СП 22.13330.2011 «Основа-



Рис. 3. Общий вид элемента и выбуренных кернов

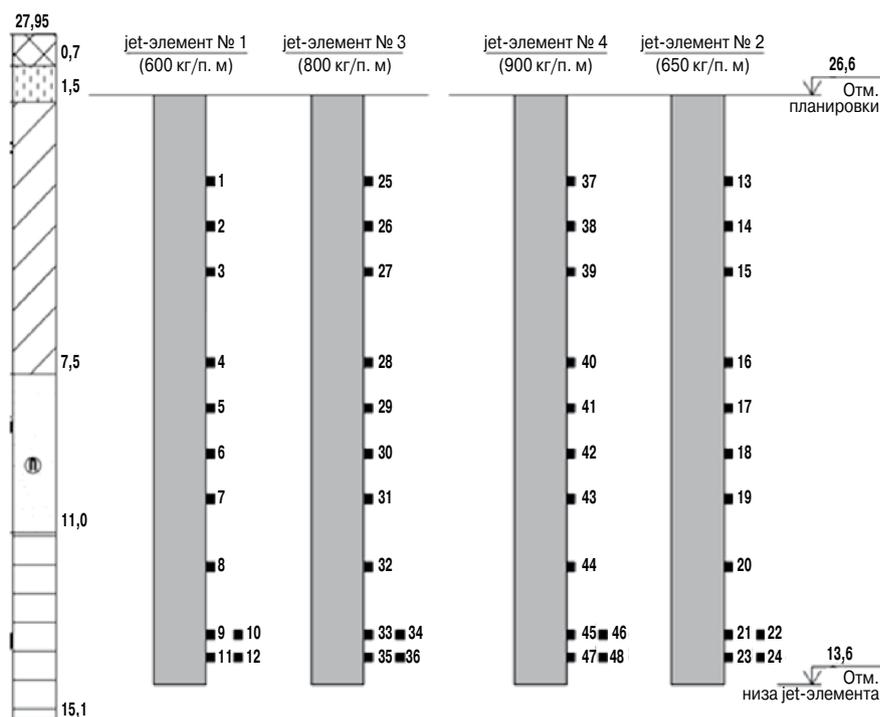


Рис. 4. Схема отбора проб грунта по глубине

ния зданий и сооружений». Техноло-
гия производства работ по струйной
цементации грунта позволяет контро-
лировать зоны уплотнения основания
и модифицировать его свойства на
оптимальную глубину.

При производстве работ на объ-
екте приняты следующие обязатель-
ные контролируемые параметры: ди-
аметр элементов не менее 1,2 м; пре-
дел прочности при сжатии на 28-е сут
4 МПа.

Была составлена программа кон-
троля качества jet-элементов при уси-
лении основания.

Цель опытных работ – определе-
ние оптимальных параметров техноло-
гического процесса для обеспечения
гарантированного диаметра элемента
не менее 1200 мм во всех инженерно-
геологических элементах и определе-
ние физико-механических характери-
стик получаемого при этом материала
(грунтоцемента).

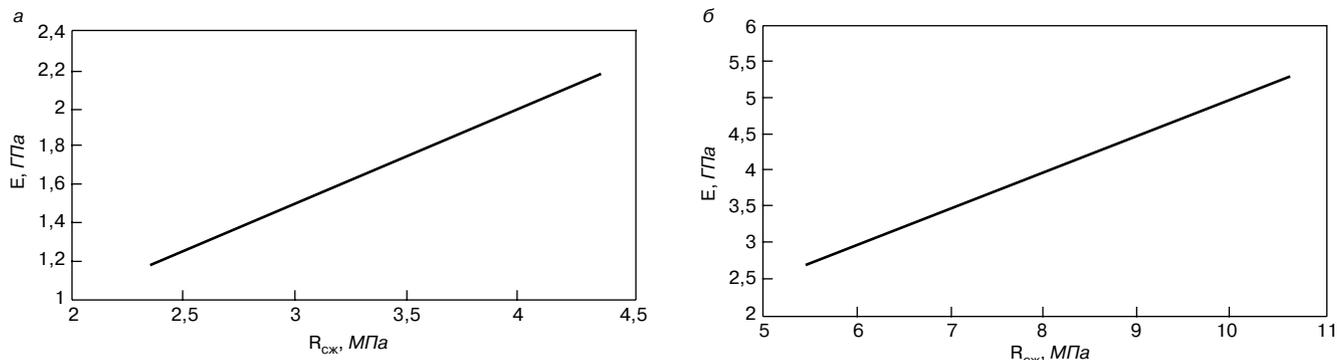


Рис. 5. Зависимость модуля деформации от предела прочности при сжатии: а – ИГЭ-2 (суглинок полутвердый), зависимость $E=f(G)$; б – ИГЭ-3 (песок пылеватый), зависимость $E=f(G)$

Технологические параметры цементации

Наименование	Ед. изм.	∅1200
Расход цемента	кг/п. м	600, 650, 800, 900
Расход воды	л/п. м	600, 650, 800, 900
Давление нагнетания раствора	кПа	45000
Давление нагнетания воздуха	кПа	800
Количество / диаметр форсунок	шт./мм	2/3
Скорость вращения буровой штанги	об/мин	32
Количество шагов при подъеме	шаг/п. м	25
Длина шага	см	4
Время инъектирования	с/шаг	4,8

Программа выполнения работ включала в себя устройство четырех грунтоцементных элементов, располагающихся на участке строящегося объекта. Грунтоцементные элементы выполнялись по технологии Jet-2 с поверхности грунта (абсолютная отметка 26,6 м) на глубину 13 м. Глубина проходки определялась исходя из инженерно-геологических условий площадки строительства.

Грунтоцементные элементы выполнялись с расходом 600, 650, 800 и 900 кг цемента на 1 п. м закрепляемого грунта.

После набора прочности грунтобетона возраст 7 сут выполнено обуривание со всех сторон выполненных элементов для определения фактического диаметра. По результатам обуривания и визуального осмотра установлено, что фактический диаметр элементов во всех инженерно-геологических элементах гарантированно превышает 1200 мм при выполнении работ с расходом цемента 650, 800, 900 кг/п. м. При расходе 600 кг/п. м диаметр составляет 1000–1200 мм, что недостаточно обеспечивает требуемые параметры элемента для армирования грунта.

Затем выполнено контрольное бурение опытных грунтобетонных элементов с отбором кернов для последующих лабораторных испытаний. С каждого элемента отобрано по 12 проб грунтобетона с глубин: 2; 3; 4; 6; 7; 8; 9; 10,5; 12; 12,5 м от поверхности грунта.

Отобранные образцы закрепленного грунта (грунтобетона) испытаны на сжатие в возрасте твердения 7 сут и в возрасте 14 сут. Определение предела прочности на сжатие ($R_{сж}$) и модуля общих деформации (E) выполнялось на универсальной испытательной машине Zwick 2-250 согласно требованиям ГОСТ 21153.2–84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии» и ГОСТ 28985–91 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии». Статистическая обработка результатов испытаний позволила определить средние величины предела прочности на сжатие и модуля деформации грунтоцемента, реализуемые в каждом инженерно-геологическом элементе при различных расходах цемента на 1 п. м.

В ходе проведенных опытных работ по закреплению грунта по техноло-

гии струйной цементации на площадке с характерными для данного объекта инженерно-геологическими условиями получены следующие экспериментальные данные:

- гарантированный диаметр элемента 1200 мм во всех инженерно-геологических элементах при данных технологических параметрах процесса струйной цементации (Jet-2) при расходе цемента 650 кг и выше на 1 п. м закрепления грунта;
- предел прочности при сжатии грунтобетона $R_{сж}$ находится в диапазоне: 3,2–5,3 МПа для ИГЭ-2 (суглинок); 8–9 МПа для ИГЭ-3 (песок); 3,4–3,8 МПа для ИГЭ-4 (глина);
- модуль деформации грунтобетона (E) находится в диапазоне: 1,5–2 ГПа для ИГЭ-2 (суглинок); 4–4,4 ГПа для ИГЭ-3 (песок); 1,5–2 ГПа для ИГЭ-4 (глина).

Полученные в ходе исследований на опытной площадке характеристики грунта использованы для разработки проектного решения и контроля качества проводимых работ. После выполнения работ по закреплению грунта основания на восьми участках пятна застройки выполнен контроль геометрических характеристик армирующих элементов и отбор более 90 проб материала (грунтобетона).

Результаты анализа подтвердили правильность проектного решения.

Литература

1. Маковецкий О.А., Зуев С.С. Обеспечение эксплуатационной надежности подземной части комплексов жилых зданий // Жилищное строительство. 2012. № 9. С. 38–41.