

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ЗДАНИЯ И ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ ФУНДАМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Р. КАТЦЕНБАХ, А. ВЕЙДЛЕ, Х. РАММ – Институт и лаборатория геотехники, Технологический университет, г. Дармштадт, Германия.

Повторное использование исторических фундаментов и конструкций в большинстве случаев представляется очень сложной задачей. В данной работе дается обзор мотиваций для их использования, при этом особое внимание уделяется геотехническим вопросам; разъясняются аспекты, которые должны быть изучены при проектировании и исполнении проекта. На примере трех немецких проектов иллюстрируются наиболее типичные трудности, возникающие при длительном повторном использовании исторических фундаментов. Здание Рейхстага – место размещения германского парламента – упоминается как наиболее важный и успешный пример повторного использования исторического фундамента существующих конструкций.

1. ВВЕДЕНИЕ

Повторное использование исторических фундаментов и конструкций обусловлено различными причинами. Так, здания, признанные историческим достоянием, не могут быть снесены или произвольно перестроены. Это ограничение может касаться не всего здания, а только отдельных его частей: фасадов или других необычных элементов строения (Essler, 2000; Goldscheider et al., 1992; Roer, 2000).

В урбанизированных районах потребность в развитии старых кварталов особенно актуальна, так как площадь для нового строительства сильно ограничена. Во многих случаях серьезный ремонт ведет к сносу основных частей здания. При этом изменение нагрузки и деформации не должны повлиять ни на оставшиеся старые конструкции, ни на новые части здания.

Другой причиной является то, что повторное или продолжающееся использование старого фундамента может быть более выгодным, чем его разборка и возведение нового.

Потребуется меньше строительных материалов, сократится время строительства, будут минимизированы выброс пыли и уровень шума. В будущем мы также столкнемся с вопросом, что делать с большими элементами использованных фундаментов, например, свайными фундаментами многоэтажных зданий.

В дополнение к геотехническому исследованию проектировщик должен проводить анализ существующих фундаментов и конструкций (Катценбах и Эннигкейт, 2001). Если геометрия и материалы фундамента не известны (в силу неполной документации строительства или утраты журналов работ), необходимо проведение обширных исследований. При этом нужно учитывать существовавшие во время первоначального строительства методы обследования грунта, строительные принципы и строительную технику. Важно понять, почему был выбран тот или иной тип фундамента и какие обследования были проведены. Важно знать, что случилось со зданием, его фундаментом и грунтом основания со времени окончания строительства, чтобы определить, какие надо провести обследования и вычисления (Штальманн и др., 2001).

При перестройке старых исторических зданий встает вопрос о несущей способности и деформациях фундамента (Улицкий, 2002). Если до этого момента фундамент остается работоспособным и целостность его элементов не изменилась, можно предположить, что и в будущем он сможет нести сравнимые нагрузки. Остается не ясным, почему приходится демонтировать фундаменты из-за проблем, связанных с расчетом их несущей способности, или изменений принципов проекта. Иногда несущую способность невозможно вычислить из-за сложности требуемой вычислительной модели. В соответствии с принципами экспериментальной механики грунтов целесообразно проводить испытания элементов существующих фундаментов статической нагрузкой (Штеффенс, 1994). Результаты, полученные при этих испытаниях, позволяют оценить способность соответствующих аналогичных (но не доступных) элементов фундамента. Эта информация помогает проектировщику смоделировать совместную работу сооружения и его основания (Катценбах и др., 2000; Моорманн и Катценбах, 2002). Более того, должна быть изучена износостойкость материала для оценки будущей несущей способности использованных элементов фундамента.

Чтобы контролировать расчетные деформации во время строительства, а при необходимости и после его окончания, следует выполнять соответствующие измерения. При использовании метода наблюдений (согласно европейским нормам – ЕС 7) требуются регулярные измерения и немедленный анализ полученных данных. Если полученная величина превышает определенные границы, следует применять предусмотренные меры для остановки прогрессирующей деформации.

Проиллюстрируем некоторые из перечисленных аспектов на трех примерах.

2. ЗДАНИЕ РЕЙХСТАГА, БЕРЛИН

Строительство здания Рейхстага осуществлялось с 1884 по 1894 г. по чертежам франкфуртского архитектора Пауля Валлота (рис. 1). Для усиления грунта под северными угловыми башнями и бывшей купольной конструкцией в центре здания было устроено 3000 деревянных свай.

К концу второй мировой войны, в конце апреля 1945 г., здание Рейхстага было почти полностью уничтожено. После взрыва купола в 1954 г. здание лежало в руинах до 60-х гг. В период с 1963 по 1971 г. здание Рейхстага было перестроено по чертежам Поля Баумгартена (Куллен, 1995).

После объединения Германии и принятия решения о переносе парламента и правительства в Берлин здание снова было перестроено по плану сэра Нормана Фостера. Современное здание венчает новый стеклянный купол, и с 1999 г. оно превратилось в место заседаний немецкого парламента.



Рис. 1. Здание Рейхстага в 1895 г.

2.1. Фундамент старого здания

Изыскательские скважины 1883 г. показали, что под южной частью здания находится твердый грунт, а под северной – опасно слабый. Согласно этим наблюдениям, слои слабого песчаного пlyingуна были обнаружены на различных глубинах в северной части площадки, а также в районе центрального купола. Плотные грунты по результатам зондирования были обнаружены только на глубине 4...5 м.

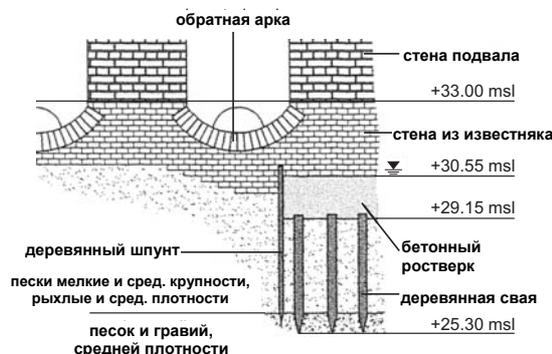


Рис. 2. Исторические фундаменты

Исторические исполнительные чертежи фундаментов не сохранились. Геометрию фундаментов пришлось определять с помощью пробных шурфов и кернового бурения, проведенных в ходе работ по реконструкции. Связь между прилегающими частями фундамента глубокого заложения, несущими большую нагрузку, и более высокими, менее нагруженными элементами была достигнута посредством постепенного изменения толщины фундамента и использования обратных арок (см. рис. 2). Под менее тяжелыми частями здания нагрузку несли одиночные и ленточные фундаменты глубиной 1,2...1,8 м.

Южные угловые башни были возведены на фундаментах неглубокого заложения – примерно 1 м ниже уровня грунтовых вод. Фундаменты строились под защитой деревянной шпунтовой стенки. Давление на грунт тяжелых угловых башен оценивается примерно в 600 кН/м².

Там, где грунты основания обладают малой несущей способностью, фундамент строился на деревянных сваях. Согласно архивным документам, для устройства фундамента под купол в гравийно-песчаный слой было забито 2232 сваи диаметром 25 см и длиной 5 м. Еще 832 сваи длиной от 2,5 до 4,0 м были забиты под фундамент северных угловых башен. Сваи располагались в шахматном порядке на расстоянии 1 м между диагональными рядами. Такая сетка свай была покрыта бетонным ростверком толщиной 1,4 м. Головы свай заглублены в бетон на 15 см.

В 1995 и 1996 гг. были проведены керновое бурение, а также пенетрационные испытания статическим в здании Рейхстага и рядом с ним. Под подошвой фундамента были обнаружены мелко- и среднезернистые пески с небольшими включениями пылеватых грунтов на глубине 8 м (25 м выше среднего уровня моря). Благодаря предварительному нагружению деревянных свай под зданием была обнаружена забутовка средней плотности, тогда как вне его забутовка довольно рыхлая. Слабые грунты и слой илистых отложений, о которых говорилось в старых документах, найдены не были. На глубине 20 м выше среднего уровня моря находится 5-метровый слой крупнозернистого песка средней плотно-

сти, и ниже этого слоя – в основном, плотно сжатый песок и гравий.

Кровля грунтовых вод находится на 1-2 м ниже подошвы фундамента и на 31 м выше среднего уровня моря. Данные об историческом положении грунтовых вод указывают на исключительно резкое понижение уровня воды (до 10 м) в период между 1936 и 1942 гг. (рис. 3). Это падение уровня было вызвано водопонижением, предпринятым в качестве подготовительной меры для строительства систем подземного движения. Таким образом, деревянные сваи под зданием Рейхстага оказались выше уровня грунтовых вод, кроме того, в этот период изменились условия окружающего их грунта.

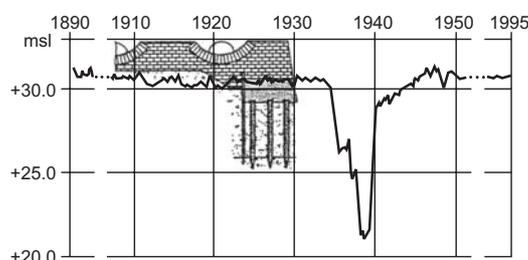


Рис. 3. Уровень грунтовых вод

2.3. Обследование старых фундаментов

В процессе реконструкции здания было необходимо обследовать деревянные сваи под северными угловыми башнями, чтобы оценить их возможную будущую работоспособность, так как они могли пострадать от изменившихся условий.

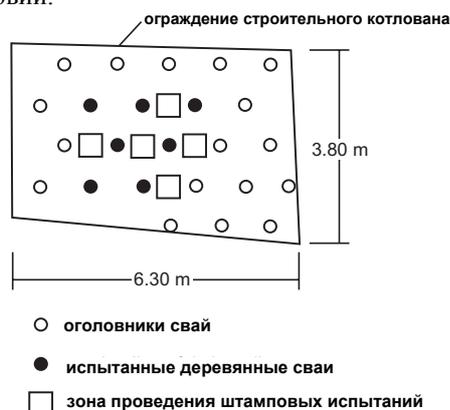


Рис. 4. Пробный котлован (испытательная площадка) в центральной части (план)

Несущая способность деревянных свай и окружающих грунтов была обследована в 1996 г. в испытательном котловане в центральной части здания Рейхстага (рис. 4). Были откопаны 24 головы свай, 7 из которых использовались для испытаний статической нагрузкой, а одна использовалась для испытания на выдёргивание после испытания статической нагрузкой.

Длина тестируемых свай – 4 м (рис. 5). Была достигнута несущая способность сваи в 200...300 кН при осадках головы сваи 4 см (рис. 6). Граница трения по стволу сваи в 13 кН/м² была установлена на основании испытаний на выдёргивание. Испытание на несущую способность грунта выполнялось с помощью штампа размером 50 x 50 см. Несущая способность грунта в 600...800 кН/м² была достигнута при осадках штампа в 4 см (рис. 7).

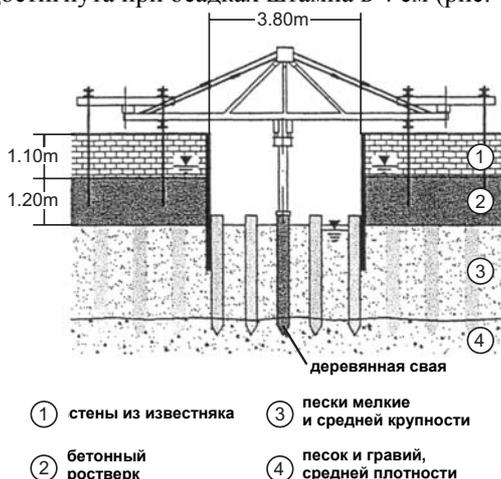


Рис. 5. Пробный котлован в центральной части здания (поперечное сечение)

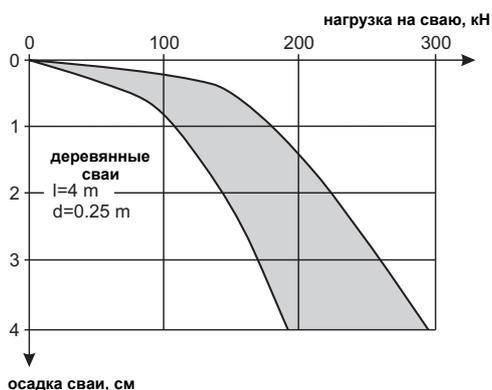


Рис. 6. Испытание деревянной сваи статической нагрузкой

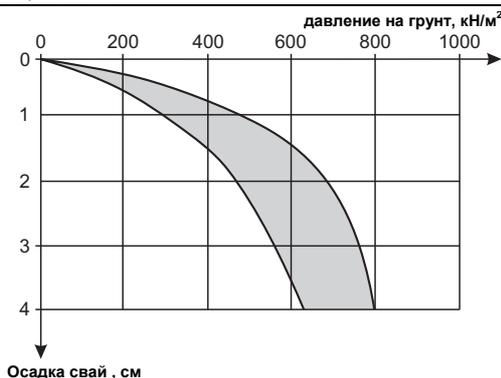


Рис. 7. Испытание грунта на несущую способность с применением штампа

Согласно результатам тестирования в лабораторных условиях, состояние деревянных свай следующее (см. таблицу):

1. Содержание ядровой и поверхностной древесины было примерно одинаковым.
2. Ядровая древесина в массе своей не повреждена.
3. Поверхностная древесина имеет различные повреждения, вызванные действием бактерий. Этот процесс длился в течение нескольких десятилетий.
4. Понижение прочности и возросшая влажность вызывают уменьшение слоя поверхностной древесины на сваях. Древесина в определенной части постоянно остается под водой.
5. Срок технической пригодности ядровой древесины составляет более 100 лет.

Таблица 1. Характеристики древесины свай

| Параметр | Ед. изм. | Ядровая древесина | Поверхностная древесина |
|--|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Влажность | % | 54 | 133 |
| Объемная плотность | кг/м ³ | 380 | 290 |
| Критическое напряжение (испытание давлением в направлении волокон) | Н/мм ² | 19 | 15 |
| Модуль Юнга | Н/мм ² | 8000 | 6000 |

Дальнейшее использование деревянных свай возможно до тех пор, пока сваи будут постоянно находиться под водой. При этом характеристики воды (особенно значения рН) не должны изменяться.

2.3. Расчет фундамента

Для оценки возникающих в ходе реконструкции дополнительных деформаций были выполнены трехмерные спаренные расчеты по конечным элементам (рис. 8). В этих расчетах основание задавалось как элемент, несущий нагрузку. В силу двойной симметричности объекта геотехническое моделирование выполнялось только для одной четверти здания Рейхстага, включая соответствующее тело грунта.

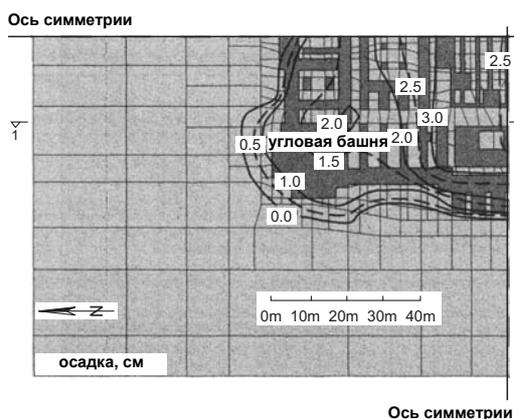


Рис. 8. Расчетные осадки от нагрузки новой конструкции

Отмечено проседание здания по всей площади горизонтального сечения (рис. 9). Расчетные осадки, вызванные нагрузкой от новых конструкций, не превышают 3 см, что составляет меньше 1/3 осадок, полученных во время строительства здания.

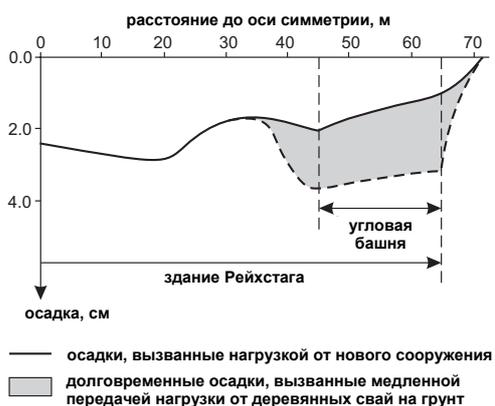


Рис. 9. Распределение рассчитанных осадок (сечение 1–1, согласно рис. 8)

Из-за медленного изменения сплошности деревянных свай имеет место перенос нагрузки со свай на песок. Если этот процесс закончится и вся нагрузка перейдет на грунт основания, появятся дополнительные осадки примерно в 2 см в угловых башнях Рейхстага. При рассчитанной доле ползучести, равной 0,1...0,2 мм в год, долгосрочная работоспособность элементов старого фундамента гарантирована. Этот положительный результат проведенных испытаний деревянных свай позволил устроить фундамент, состоящий из старых и новых элементов.

2.4. Фундаменты реконструированного здания Рейхстага

До начала реконструкции была полностью разобрана центральная часть здания. Для нового зала пленарных заседаний и купола был устроен новый фундамент на 90 инъектированных по всей длине ствола буронабивных сваях диаметром 0,9...1,5 м и длиной от 15 до 27 м (рис. 10).

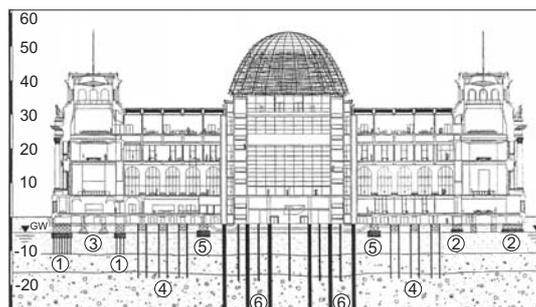


Рис. 10. Старый и новый фундамент здания Рейхстага

Чтобы синхронизировать осадки новых частей конструкции с деформацией старых, было решено применить небольшие буронабивные сваи с инъектированными участками в плотных песках. Кроме того, эти сваи использовались для уменьшения дополнительных нагрузок перегруженных частей старого фундамента неглубокого заложения.

В углублениях, например в лифтовых шахтах или понижениях уровня подвала, старый фундамент неглубокого заложения укреплялся методом инъектирования.

3. СОХРАНЕНИЕ ИСТОРИЧЕСКОГО ФАСАДА, ВРЕМЕННО УСИЛЕННОГО РАМАМИ

Этот проект выполнялся для исторического здания банка, полностью разобранного внутри, для того чтобы возвести новое основное здание внутри исторического фасада. Это здание располагается в центре города, в окружении магазинов, гостиниц и других зданий, представляющих исторический интерес. Тремя своими сторонами историческое здание выходит на маленькие, но оживленные улочки, четвертая – примыкает к другому историческому зданию, которое находится под охраной государства. На рис. 11 видно, какой маленькой была строительная площадка.



Рис. 11. Разобранное историческое здание с сохраненными фасадами

3.1. Подпорная система

Чтобы уменьшить неудобства, вызванные проведением строительных работ, временно укрепим внешний фасад рамой. Так как было выявлено, что исторический фасад стоит на ленточном фундаменте глубиной от 2,5 до более 4 м, были проведены работы по его укреплению с использованием технологии иньекцирования.

Для укрепления были установлены четыре внешние рамы (SG1 до SG4), как показано на плане (рис. 12). Поддерживающей системой для строительного котлована (макс. 10 м ниже уровня улицы и макс. 5 м ниже ленточного фундамента) служили иньекцированные

гравитационные подпорные стенки, которые использовались и как подпорные стенки, и принимали часть вертикальных компрессионных сил от рам. Ленточные фундаменты под фасадами также воспринимали вертикальную нагрузку. Гравитационные подпорные стенки закреплялись двумя рядами анкеров с наклоном примерно 10° . Для отведения вертикальных сжимающих усилий, например вызванных нагрузкой на фасады от ветра, были установлены анкера под углом 45° . Горизонтальные растягивающие силы должны были восприниматься вертикальными анкерами (рис. 13).

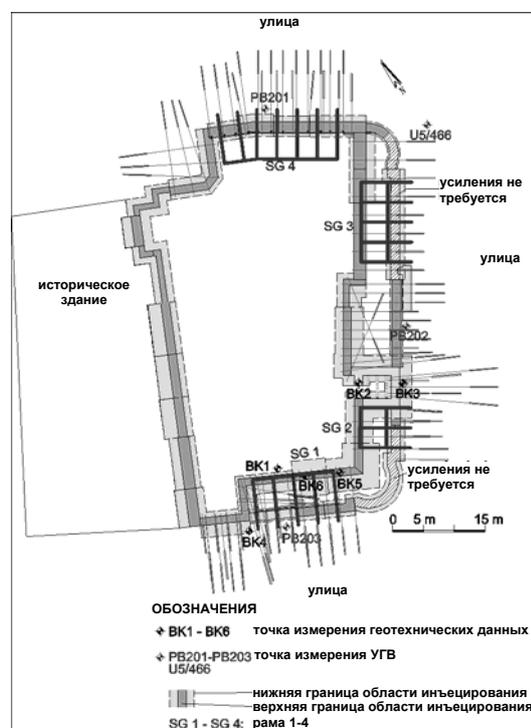


Рис. 12. План строительной площадки, включая работы по иньекцированию, точки измерений и т. п.

Вдоль северного фасада контрфорс рамы SG4 был установлен на иньекцированные сваи (рис. 14).

3.2. Грунтовые условия и грунтовые воды

Ниже уровня улицы был обнаружен насыпной слой мощностью 3,5 м, который соотносится с уровнем ленточного фундамента под фасадом. Под насыпным слоем находится четвертичный песочный гравий мощно-

стью 4...5 м. Далее был обнаружен третичный слой. Во время строительства вершина обычного волнообразного третичного слоя состояла из более или менее связных грунтов, в основном глины и пылеватых грунтов с различным содержанием песка. Толщина слоя – примерно 2 м. Ниже находится смешанный слой пылеватого грунта с песком и однородный мелко- и среднезернистый песок, которые чередуются до глубины 15 м ниже уровня улицы. Затем на всю глубину, доступную для наблюдения, идут слои связных, частично цементированных слоев пылеватого грунта и глины.

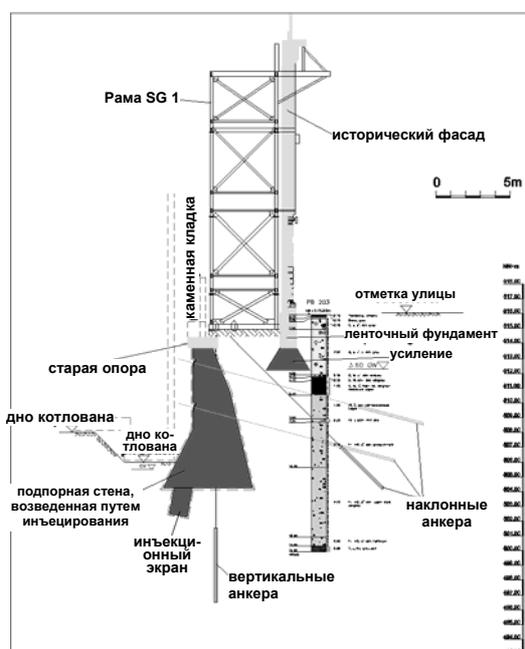


Рис. 13. Сечение подпорной системы, рама SG1

Уровень грунтовых вод находится на отметке 6 м ниже уровня улицы. Предполагалось, что на него повлияли мероприятия по водоотведению, принимаемые во время строительства в нескольких близлежащих местах.

На время устройства строительного котлована и возведения нового фундамента требовалось понизить уровень грунтовых вод до отметки 11 м ниже уровня улицы.



Рис. 14. Контрфорс рамы SG4 на северной стороне

3.3. Концепция геотехнических и геодезических наблюдений

Для обеспечения безопасного проведения строительных работ и предотвращения разрушения исторических фасадов, а также близлежащих зданий были приняты следующие меры непрерывных наблюдений:

- наблюдение за уровнем грунтовых вод до, во время и после водопонижения в восьми точках, расположенных как на самой строительной площадке, так и вокруг нее;

- сохранение данных мониторинга по историческому фасаду здания и фасадам близлежащих зданий и сооружений;

- постоянный мониторинг существующих (старых) трещин на фасаде, а также отслеживание появления новых;

- геодезическое наблюдение за вертикальными и горизонтальными деформациями фасада и рам с особым вниманием к контрфорсам;

- геодезическое наблюдение за вертикальными и горизонтальными деформациями подпорных конструкций и ленточных фундаментов в шести самых критических местах;

- визуальные наблюдения за фасадом и откопанными подпорными конструкциями;

- наблюдения за усилиями в анкерах при помощи 15 датчиков напряжения, установленных на наклонных анкерах, и 20 испытаний вертикальных анкеров.

3.4. Выявление и исправление повреждений

Благодаря интенсивному мониторингу вовремя был замечен крен рамы SG1 вместе с фасадом (рис. 15). Было выявлено, что крен с максимальным горизонтальным отклонением

более чем в 10 см в верхней части рамы вызван рядом проблем с подпорными конструкциями. Своевременное применение защитных мер (рис. 16) позволило предотвратить дальнейшее разрушение фасада. Проведенное расследование показало, что повреждения (рис. 17) произошли из-за интенсивной деформации подпорной стенки, которая спровоцировала пучение грунта в районе контрфорсов и, как следствие, крен рамы и фасада. Результаты измерений вертикальных деформаций позволили обозначить грунт основания под подпорной конструкцией как причину повреждений.

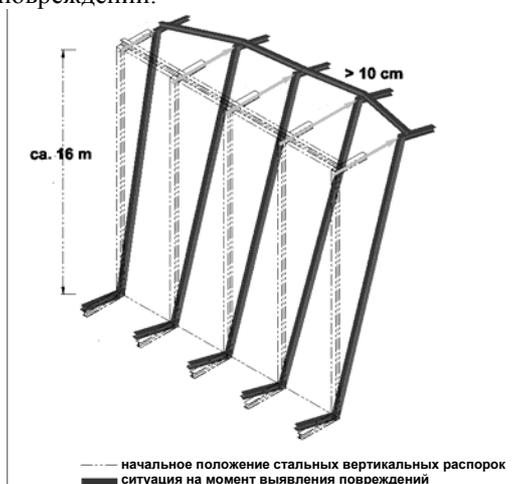


Рис. 15. Крен рамы SG1 в день обнаружения

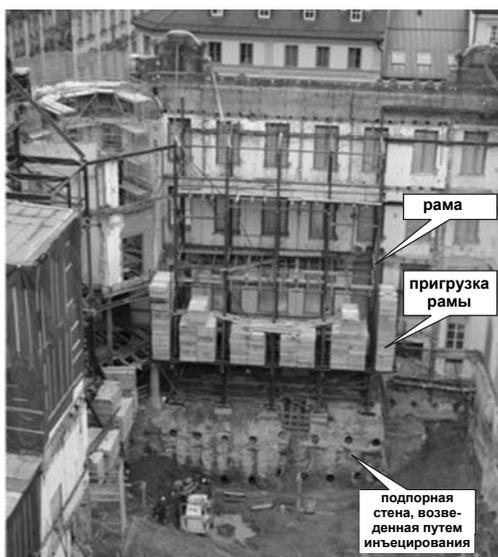


Рис. 16. Балласт, размещенный на раме SG1, для разгрузки анкеров

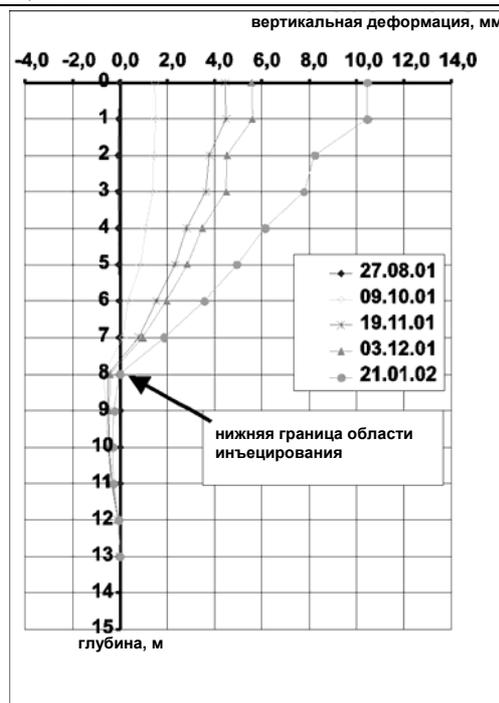


Рис. 17. Результаты измерений вертикальных деформаций в инъектированной конструкции и под ней

4. "PORTIKUS", ФРАНКФУРТ

Здание бывшей городской библиотеки города Франкфурт было построено в период с 1820 по 1822 г. Во время второй мировой войны здание было разрушено бомбардировками, сохранились только фрагменты фасада и вход (рис. 18). Так называемый Portikus (портик) сейчас предстоит включить в реконструируемое здание.



Рис. 18. Разрушенная городская библиотека – Portikus

Строительная площадка располагалась на месте бывшей городской стены в восточной части центра города (рис. 19). В поверхностных грунтах доминируют насыпные грунты, оставшиеся со времен сооружения исторической крепости, и отложения от бывшего водяного рва. Из-за геометрии древней стены и рва толщина насыпного слоя варьирует от 6 до 10 м.

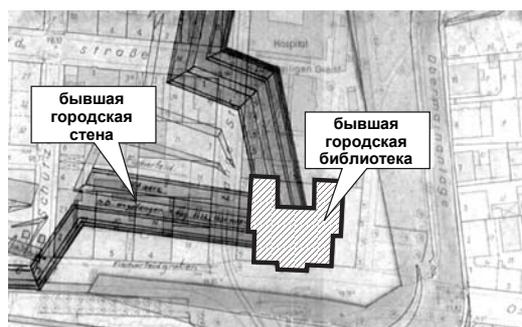


Рис. 19. Ситуационный план бывшей городской библиотеки

Согласно историческим источникам, фундаменты библиотеки были устроены на свайной сетке. Нижний слой фундамента изготовлен из обработанного песчаника, над ним находится смешанная каменная кладка. Проблема заключается в том, как включить фасад в новое здание. Было рассмотрено три разных метода. Чтобы понизить неравномерные осадки существующей и новой конструкций, можно разобрать портик и воссоздать его во время строительства нового здания на совмещенных фундаментах.

Чтобы сохранить существующий фасад и закончить новое здание, включая и фундамент, потребуются меры по усилению фундамента. Инъектирование является очень эффективным способом, так как не вызывает вредных вибраций и не требует значительного рабочего пространства. Другая возможность состоит в раздельной реконструкции здания. Деформационный шов между старой и новой конструкциями допускает неравномерные осадки и заполняется после окончания строительства.

Обоснованное вторичное использование исторических фундаментов и конструкций практически в каждом случае является трудной задачей для инженеров-строителей, особенно тогда, когда следует учитывать геотехнические аспекты. Кроме обычных исследований, должен быть собран и принят во внимание огромный объем информации, например, исторические данные об исследованиях грунта, технологии проведения работ; история конструкций, например, нагрузка, влияние окружения (Катценбах и др., 2002). В период подготовки проекта обычно встает проблема подтверждения несущей способности, так как во многих случаях старые конструкции не отвечают современным требованиям безопасности и применение проектных процедур не обеспечивает достаточную безопасность. В этом случае можно использовать инновационные методы: экспериментальную механику грунтов и статику (Штеффенс, 1994). Интенсивный метод наблюдений (мониторинг), уже зафиксированный в европейском коде 7 (EC7), является важным подспорьем во время строительства, когда исторические элементы подвергаются чрезмерным нагрузкам, особенно вызванным деформациями в процессе проведения работ.

Для исследования феноменов, возникающих при вторичном использовании исторических фундаментов, был создан европейский исследовательский проект RUFUS (вторичное использование фундаментов на территориях городов), который финансируется Европейской комиссией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. EN 1997 Eurocode 7 (EC7): Geotechnical design. CEN: Brussels.
2. Cullen M., 1995. Der Reichstag; Parlament Denkmal Symbol Berlin. be.bra verlag.
3. Essler R. D. 2000. The Great Court Project, British Museum, London, Jet Grouting to underpin the foundations of the Reading Room. Beiträge zum 15. Christian Veder Kolloquium TU Graz, Heft 7, pp. 143–154.
4. Goldscheider M., Krieg S., Ladjarević M. 1992. Die Gründungen des Südostflügels des Schweriner Schlosses zwischen Hauptturm und Südturm.

Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Sonderforschungsbereich 315 Jahrbuch 1992, pp. 133–162.

5. *Katzenbach R., Arslan U., Moormann Chr.* 2000. Soil-structure interaction of deep excavations in urban environment: Fundamental considerations on design and performance of building pits in soft clay. Proc. of the International Symposium 'Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground', Tokyo, Japan, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 523–529.

6. *Katzenbach R., Ennigkeit A.* 2001. Mängelfreie Baugrund- und Gründungsbegutachtung als wesentliche Basis der erfolgreichen Bauschadensprävention. Der Sachverständige, pp. 46–52.

7. *Katzenbach R., Fehsenfeld A., Weidle A.* 2002. Geotechnical and Environmental Input During Planning, Design and Execution. 4th International Conference on Ground Improvement Techniques, Kuala Lumpur, Malaysia.

8. *Moormann Chr., Katzenbach R.* 2002. Three dimensional effects of deep excavations with rectangu-

lar shape. Proc. of the 2nd International Conference on Soil Structure Interaction in Urban Civil Engineering, Zurich, Switzerland, Vol. 1, pp. 135–142.

9. *Roer M.* 2000. Spezialtiefbau beim Staatstheater Mainz. Beiträge zum 15. Christian Veder Kolloquium TU Graz, Heft 7, pp. 243–258.

10. *Stahlmann J., El-Mossallamy Y., Leinenbach J., Ittershagen M.* 2001. Sicherung gegen Schiefstellung eines (Hochhaus-)Turms - nicht nur eine historische Aufgabenstellung. Vorträge zum 8. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 15. März 2001, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 55, pp. 113–125.

11. *Steffens K.* 1994. Experimentell gestützte Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens der Brücke über die Stepenitz. Bautechnik, Vol. 71, pp. 782–791.

12. *Ulitsky V. M., Shashkin A. G., Shashkin K. G.* 2002. Soil-structure interaction: Methodology of analysis and application in design. Stroyizdat, 41 p.