

СОСТОЯНИЕ КАФЕДРАЛЬНОГО СОБОРА В ГОРОДЕ МЕХИКО ПОСЛЕ ПОДРАБОТКИ И ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТА

Э. САНТОЙО – профессор, компания «ТГС Геотекника, Геотехнические Консультации», г. Мехико, Мексика.

Э. ОВАНДО-ШЕЛЛИ – профессор Инженерного института, UNAM, г. Мехико, Мексика.

Подработка грунтов основания кафедрального собора города Мехико, проведенная с 1993 по 1998 г., привела к корректирующим деформациям собора, которые ликвидировали большую часть неравномерных осадков, накопившихся за предыдущие 65 лет вследствие общего оседания грунта в регионе. Влияние общего оседания грунта вторично проявилось после окончания подработки.

В настоящей статье мы описываем работы, в ходе которых чрезвычайно слабые глинистые грунты, залегающие в основании кафедрального собора и близлежащей церкви Саграрио были избирательно усилены. Усиление, послужившее превентивной мерой против нарастания осадков в будущем, производилось путем инъекционного нагнетания раствора. Данные наблюдений свидетельствуют о том, что эта мера оказалась успешной.

1. ВВЕДЕНИЕ

Кафедральный собор Мехико получил большие неравномерные осадки, которые начались еще в период его строительства. С учетом инженерных и геологических условий площадки в 1989 г. для уменьшения неравномерных осадков была использована технология экскавации грунта основания (подработки). Подработка основания, начавшаяся в октябре 1991 г., детально описана (Tamez et al, 1995; Ovando and Santoyo, 1996; Tamez et al, 1997, Ovando and Santoyo 2001). Ниже мы подведем итог всем вышеназванным работам, а также в сжатой форме изложим результаты дополнительных мероприятий, предпринятых после июня 1998 г., когда были завершены работы по выемке грунта.

1.1. Характеристики собора

Общие сведения. Строительство кафедрального собора началось в 1573 г. на руинах до-испанских строений (пирамидальных храмов, ритуальных площадей и даже больших

дворцов), расположенных на главной церемониальной территории ацтеков (Ovando and Manzanilla, 1997). Своды храма были возведены примерно к 1667 г., а фасады – в 1675 г.; строительство колоколен завершилось в 1792 г. Храм был освящен в 1813 г. Как видно на рис. 1, в храме 5 нефов: центральный ограничен 16 колоннами и разделен хорами; два боковых придела тянутся по всей длине храма; а в двух поперечных нефах располагаются часовни, ограниченные периферийными и перпендикулярными стенами. Центральный купол поддерживают 4 колонны. Две колокольни высотой 60 м оказывают среднее давление величиной 420 кПа. Длина собора 126,67 м, а ширина – 60,4 м. Общий вес строения – 12700 кН, а среднее давление на грунты основания равняется 166 кПа (см. рис. 1). Примыкающая к собору церковь Эль Саграрио (*El Sagrario*) в плане имеет форму греческого (равностороннего) креста, ее стены по четырем углам обеспечивают жесткость конструкции, а купол покоится на четырех центральных колоннах. Церковь имеет форму квадрата со стороной 47,7 м, весит около 3000 кН и оказывает среднее давление на грунт порядка 132 кПа.

Фундамент. Основание было усилено путем забивки примерно 22500 коротких деревянных свай длиной от 3 до 4 м. На сваях была возведена кирпичная платформа площадью 140x70 м. В среднем ее толщина равняется 90 см, но она увеличивается к югу. Это может быть признаком того, что неравномерные осадки появились еще на этапе строительства. На платформе были уложены каменные балки в виде сетки (высотой 3,5 м и шириной 2,5 м, длина каждой из них достигает 127 м) для устройства на них стен, пилястр и колонн.

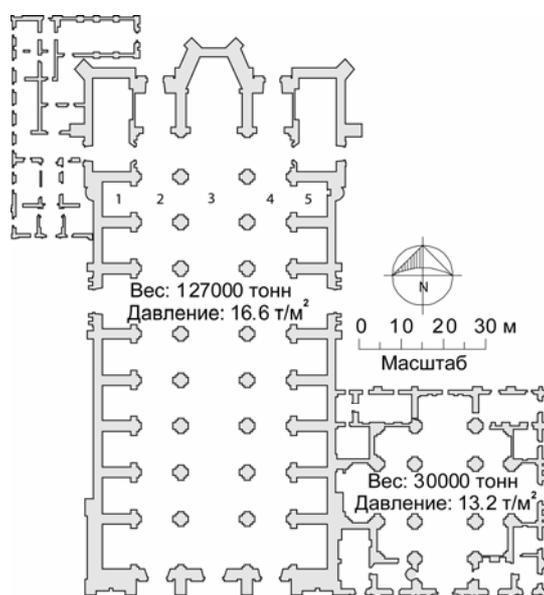


Рис. 1. План кафедрального собора и церкви Сагарио

Церковь Эль Сагарио, построенная между 1749 и 1768 гг., была возведена на месте пирамиды Тонатиух (Tonatiuh), что у ацтеков означало «солнце». Для устройства фундамента использовалась та же процедура, что и при закладке кафедрального собора, т. е. усиление грунта короткими деревянными сваями, но меньшего диаметра. Сверху на них была положена кирпичная платформа невысокого качества.

Грунты основания. На стадии предварительных изысканий, проведенных в 1989 г., была выполнена 21 вертикаль статического зондирования СРТ, а также две скважины для сплошного отбора образцов грунта ненарушенной структуры.

Перед началом работ в 1995 г. были выполнены дополнительно 29 вертикалей статического зондирования вместе. Результаты исследований приведены на рис. 2. На границе между церковью и собором зафиксирована более высокая степень сопротивления грунта пенетрации, так как на эту площадь приходилась максимальная нагрузка от храмов ацтеков, археологических развалин и двух тяжелых колониальных построек. Однако по направлению к обоим краям поперечного сечения сопротивление пенетрации уменьшается почти в два раза. На рис. 2 также представлено напластование слоев грунта на данной площадке.

Верхний слой составляют археологические развалины и насыпи. Затем идет слой обезвоженных пылеватых глин. Далее следуют наиболее сжимаемые грунты (на рис. 2 они обозначены как *FAS*, верхние глинистые отложения). Ниже, на глубине 40 м, залегает слой твердого грунта, под которым находится второй слой глины *FAI*, менее сжимаемый (по сравнению с верхними) (см. рис. 2). В основании геологического разреза на глубине 45 м, залегают пылеватые и песчаные наносные отложения, перемежающиеся с плотными глинами.

Деформация грунта основания, предшествующие строительству собора. На основе данных статического зондирования было установлено, что в результате уплотнения, вызванного пирамидами ацтеков, грунты основания под собором в некоторых местах сжались не менее чем на 10 м (см. рис. 2). Перед строительством колониальных церквей площадку выравнивали методом дополнительной засыпки, чтобы образовать новую ровную поверхность. Такая сложная история нагружения грунта привела к неоднородности свойств и характеристик грунтов основания.

Осадки, появившиеся во время строительства. Неравномерная сжимаемость слоев грунта вызвала неравномерные осадки уже в период строительства храма. В свою очередь, эти деформации привели к смещениям конструкций, которые были компенсированы изменением высоты колонн и стены с целью выравнивания пяты сводов. Также использовались расклинивающие блоки, для того чтобы скрыть заметные осадки, например в обеих

колокольных. Максимальная разность осадок, накопившаяся за период строительства собора, равнялась 85 см.

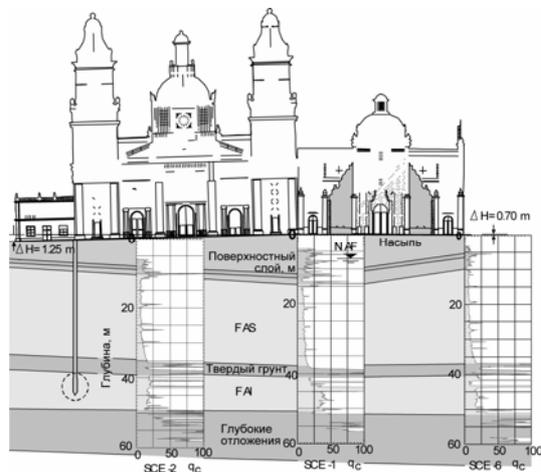


Рис. 2. Основные типы грунтов вдоль оси восток–запад в южном атриуме

Накопленные осадки. Деформации, накопившиеся за 419 лет – с начала строительства и до конца 1989 г., вызвали неравномерные осадки в 2,42 м между апсидой и западной колокольной. Их развитие обусловлено двумя факторами: а) уплотнением от веса ранее существовавших ацтекских храмов и последующих колониальных зданий; б) общим оседанием грунта в городе. Последнее стало решающим фактором в накоплении неравномерных осадок в течение последних 150 лет, оно вызвало осадку западной колокольной величиной 87 см в период с 1907 по 1989 г. (рис. 3).

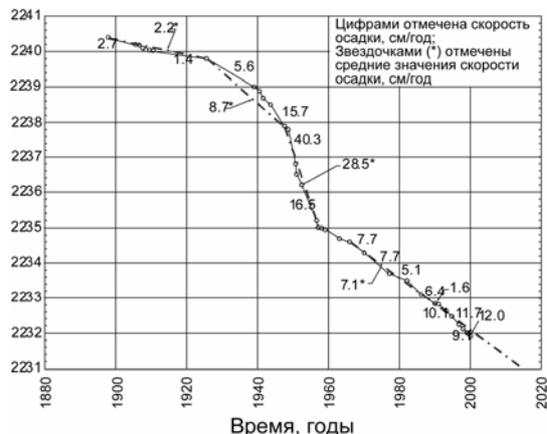


Рис. 3. Общая осадка в основании западной башни в XX в.

Реперная линия, зафиксированная в основании западной колокольной, опустилась более чем на 8 м в течение XX столетия, из них примерно на 2,6 м за последние 35 лет (по отношению к зафиксированной точке на обнаженной горной породе). В период между 1965 и 1990 гг. скорость осадки составляла 7,1 см в год, в 1991 г. она уменьшилась до 1,6 см в год, а позже в результате подработки с 1991 по 2000 г. она временно увеличилась до 10 см в год.

Работы по усилению фундамента. Были предприняты попытки осуществить два проекта усиления фундамента собора. Обе попытки оказались неудачными. Первый проект был выполнен в сороковых годах. Он предусматривал удаление наполнения первоначальных ячеек фундамента и возведение 50-сантиметровой железобетонной плиты, усиленной балками в обоих направлениях. Вторая попытка была предпринята в 1975 г, когда пытались использовать сваи с устройством, контролирующим силу нагрузки, передаваемую на голову сваи. Но изменить поведение фундамента удалось только временно, так как группа свай могла воспринимать максимальную нагрузку, составлявшую всего лишь около 30% от общего веса собора.

Распределение осадок. Измерения по глубинным реперам, установленным в западном атриуме, показали, что на верхний слой глины приходится 54% общих осадок поверхности, на нижний –15%, а на глубоко залегающие пылеватые глины – оставшиеся 31% (рис. 4).

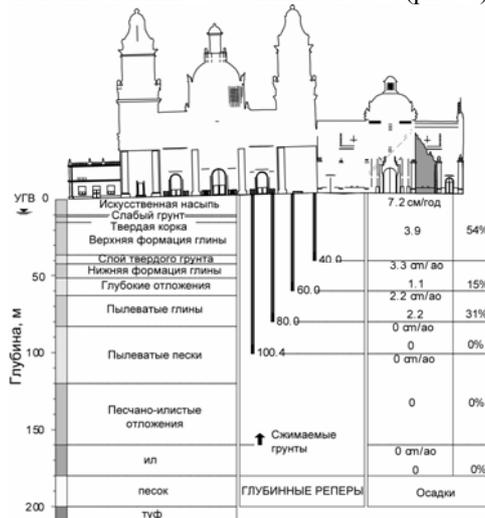


Рис. 4. Распределение осадок в грунте основания (с марта 1991 г. по май 1992 г.)

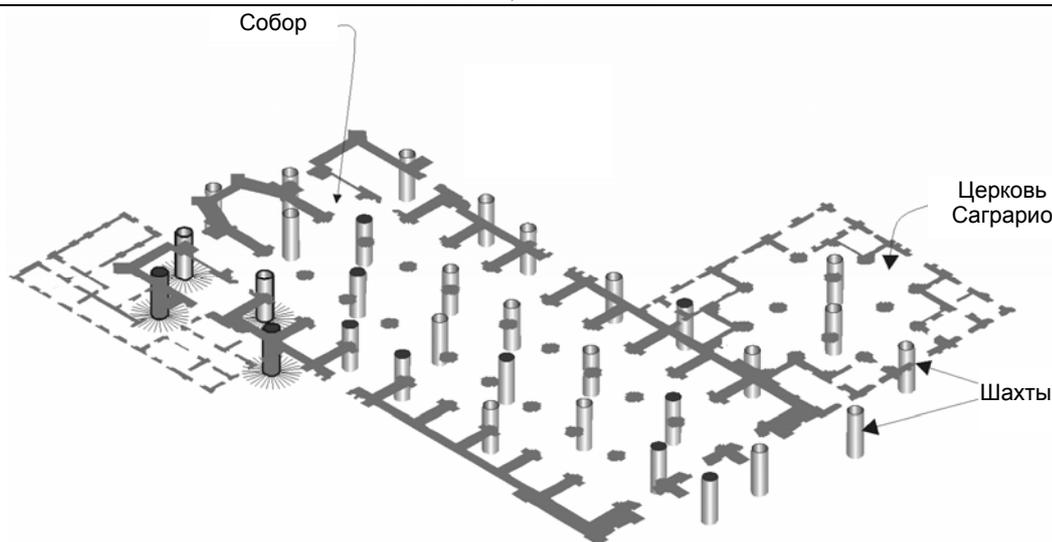


Рис. 5. Расположение шахт для подработки

1.2. Геотехническая оценка

Согласно прогнозу, если не будут приняты коррективные или предупредительные меры, западная колокольня получит неравномерные осадки около 5 м, тогда как в церкви Саграрио средняя осадка между центральной зоной и углами будет равна 3 м. Максимальных величин осадки достигнут в западной колокольне, что увеличит ее крен с 3 до 6%.

Вследствие этого любое землетрясение достаточной силы сможет создать напряженное состояние, которое окажется серьезным фактором риска для устойчивости церквей, особенно для западной колокольни.

1.3. Проанализированные решения

Были рассмотрены следующие способы корректировки неравномерных осадок и предупреждения снижения будущих неравномерных вертикальных деформаций: а) восстановление давления в поровой воде путем установки гибких непроницаемых барьеров на глубине 65 м и пополнения запаса грунтовой воды при помощи 46 инфильтрационных колодцев; б) усиление фундамента за счет забивки 1500 висячих свай с отрицательным трением; в) усиление фундамента при помощи устройства 240 буровых свай, упирающихся либо в слой глубоких отложений, либо в первый слой твердого грунта; г) подработка грун-

та, рассматриваемая в связи с низкой эффективностью первого метода и чрезвычайной сложностью выполнения двух других.

2. ПОДРАБОТКА ГРУНТА

Для выполнения работ по подработке грунта из основания собора требовались: а) устройство 32 шахт, чтобы достичь верхнего слоя сжимаемой глины, расположенного на глубине 14...21 м; б) водопонижение до строго определенного уровня; в) контролируемая выборка небольших заранее установленных объемов грунта. Места расположения шахт показаны на рис. 5. Для извлечения грунта было использовано устройство, представляющее собой тонкостенную трубу, обычно применяемую для решения геотехнических задач (рис. 6). Было извлечено в общей сложности 4220 м³ грунта со средней глубины 20 м.

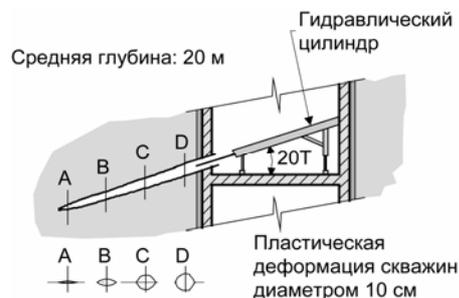


Рис. 6. Схематическое изображение приспособления для выборки грунта

Извлекались мягкие глины на верхней границе первой формации. Из каждой шахты удалось сделать максимум 50 радиальных скважин для проникновения в грунт на расстояние от 6 до 22 м.

2.1. Достигнутые результаты

Специалисты по сохранению архитектурных памятников, а также инженеры и геотехники поставили перед собой следующие цели: 1) понизить апсиду с 80 до 95 см, стараясь по возможности максимально соблюдать схему перемещения жесткого штампа; 2) вызвать дополнительное закрытие или поворот боковых стен для усиления “пояса противодействия”, состоящего из внутренних стен часовен и стен по периметру собора; 3) устранить крен церкви Саграрио, осевшей на 30 см в северной части. Выемка грунта началась в сентябре 1993 г. и завершилась в июне 1998 г.

Геометрия корректирующих осадок. Цель, поставленная геотехниками, была достигнута: неравномерные осадки, накопившиеся за последние 65 лет в результате общего оседания грунта в регионе, были устранены. Максимальная коррекция между апсидой и юго-западным углом составила 92 см. Корректирующие осадки между точками в осях С-3 и В-10 изменились с 243 см в 1989 г. до 156 см к июню 1998 г., что также привело к средней угловой коррекции в $25^{\circ}33'$ между точками в осях D-1 и А-12. Как видно на рис. 7, в сентябре 1999 г. максимальная разница осадок снизилась до 88 см между западной колокольней и апсидой и до 30 см – в церкви Саграрио. Эта разница (92 и 88 см) могла быть вызвана тем, что по окончании подработки и откачки воды сказалось общее проседание грунта, и эффект достигнутых корректирующих осадок был частично утрачен.

3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Так как разрушительный эффект общего проседания грунта вновь сказался после приостановки работ по выемке грунта в июне 1998 г., было решено укрепить наиболее слабые участки основания методом инъецирования, чтобы снизить сжимаемость грунта. Инъецирование схватывающегося раствора тради-

ционно использовалось в геотехнике большей частью для устройства водонепроницаемых барьеров в основании дамб или других крупных сооружений. В подземном строительстве “компенсационное инъецирование” применялось для уменьшения осадок, вызванных устройством тоннелей в разнообразных грунтах (напр., Chambosse и Otterbein, 2001). Но этот метод очень редко применялся в условиях очень мягких нормально уплотненных грунтов, таких как глины города Мехико.

Исходные данные. Авторы детально изучили случай Дворца изобразительных искусств (Palacio de Bellas Artes), также расположенного в Мехико, в котором во время устройства фундаментной плиты в 1906 г. стали накапливаться большие неравномерные осадки. В связи с этим в период с 1910 по 1925 г. было принято решение укрепить грунты основания при помощи схватывающихся растворов: сначала – цементным раствором, а затем – жидким раствором, вероятно, приготовленным с использованием известняка и песка. Цель инъецирования заключалась в том, чтобы радикально остановить возникновение осадок, но эта попытка не увенчалась успехом. И все же проведение инъецирования можно считать успешным, потому что, хотя осадки и не были остановлены, они стали равномерными, и возникновения дефектов в конструкциях здания удалось избежать. Такая же процедура была проведена и в 1881 г. на здании железнодорожного вокзала Буэнависта (Buenavista). К сожалению, не сохранилось никаких документированных данных об этом первом применении данного метода, имевшем место более века назад.

Инъецирование грунтов основания Дворца изобразительных искусств вызвало противоречивые отклики, и многие задавались вопросом о его эффективности. Его результаты были неправильно истолкованы, так как считалось, что грунт пропитывался раствором. В то время не принималось во внимание общее проседание грунта в городе, и принципы механики гидроразрыва не были известны. Ремонтные работы были прекращены, и здание осталось незавершенным до конца 30-х годов. Вся техническая информация была подшита, и превалирующим осталось несправедливое ут-

верждение о том, что иньектирование грунта не смогло выполнить поставленной задачи. Этот почти забытый случай является поразительным примером разработанного метода, который был применен для изменения сжимаемости грунта основания кафедрального собора.

3.1. Теоретические и практические исследования

Опыт, полученный при проведении иньектирования Дворца изобразительных искусств, был принят во внимание при обследовании, выполненном для того, чтобы установить количество и характеристики раствора, обеспечивающего снижение сжимаемости глин под кафедральным собором. Испытания в полевых условиях были вначале выполнены в историческом русле озера Текскоко. Были проведены также лабораторные испытания, теоретические исследования в области гидроразрыва и численное моделирование эффекта ввода жидких связующих растворов в грунт.

Жидкости, иньектированные под давлением в мягкие материалы с низкой прочностью

на сдвиг, такие как глины города Мехико, вызывают гидравлический разрыв. Иньектируемый раствор проникает в щели и трещины, и при его затвердевании сжимаемость данного грунта уменьшается. Раствор формирует экран, ориентация которого зависит от напряженного состояния грунта. Основы механики разрушения говорят о том, что в нормально уплотненных или слегка переуплотненных грунтах эти экраны будут вертикальными или почти вертикальными.

Сжимаемость грунта, подвергаемого подобной обработке, зависит от деформативности раствора и количества иньектированного материала. Это может быть выражено следующей зависимостью, выведенной на основе результатов испытаний на компрессионное сжатие и полевых испытаний:

$$K_p = (RK_m + K_s) / (I + R), \quad (1)$$

где $K_p = 1/m_{vp}$ – жесткость иньектируемой глины; m_{vp} – модуль объемного сжатия иньектируемой глины; $K_s = 1/m_{vs}$ – жесткость глины в естественном состоянии; m_{vs} – модуль объемного сжатия глины в естественном состоянии;

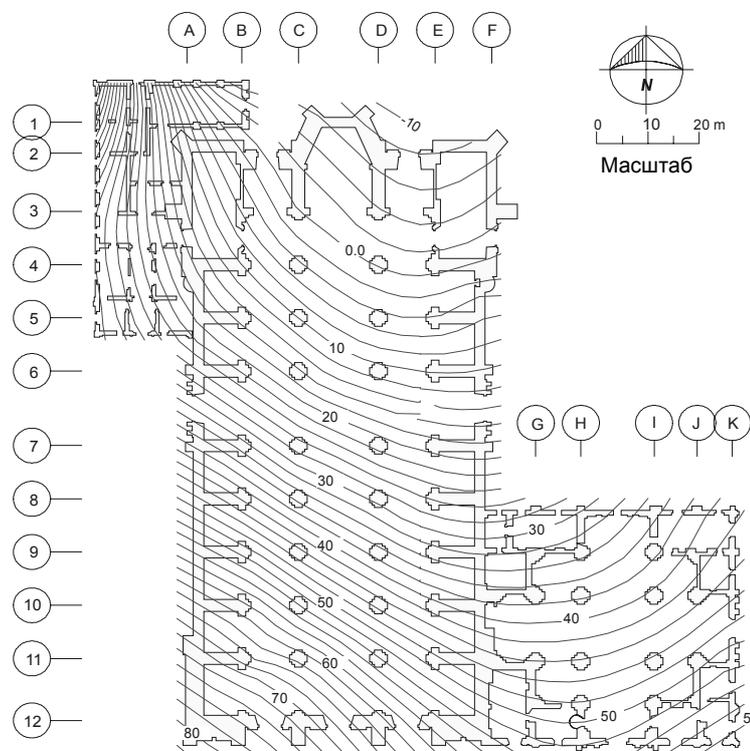


Рис. 7. Изолинии корректирующих осадок, вызванных подработкой (с октября 1991 г. по сентябрь 1999 г.)

$K_m = 1/m_{vm}$ – жесткость раствора; m_{vm} – модуль объемного сжатия раствора; R – отношение объема инъецируемого в глину раствора к общему объему грунта.

3.2. Технология инъецирования

Технология инъецирования была протестирована на площадке за пределами города, где также были обнаружены очень мягкие глины. Сначала формируется ядро из раствора диаметром 26 см, имеющее ограничительный рукав из геотекстиля. Внутри рукава раствор инъецируется через перфорированный пластиковый манжет. Это ядро действует как жесткое включение внутри грунта.

Внутри ядер, но за пределами рукава, вставлялись еще две пластиковые трубки. Раствор, закачанный через эти внешние трубки, образовал экраны, которые захватывали 2...3 м по сторонам от ядра (рис. 8).

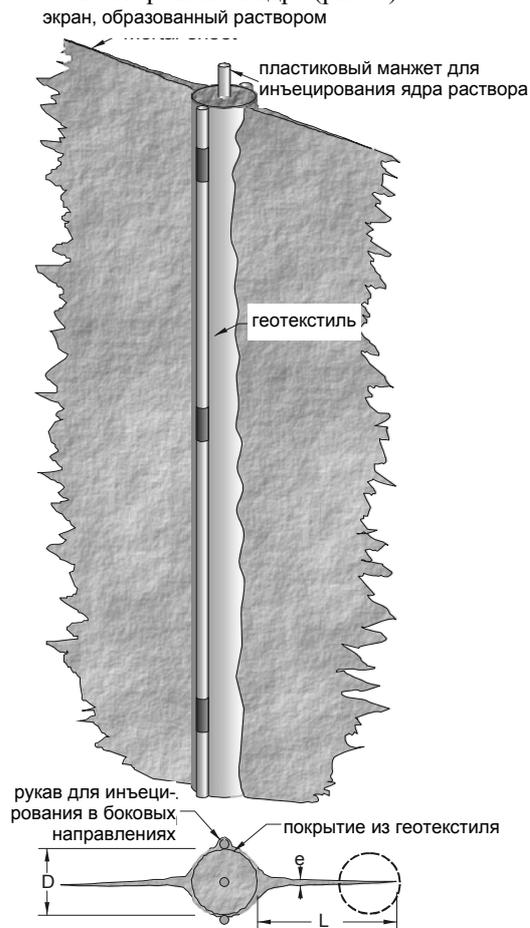


Рис. 8. Ядра раствора и боковые экраны

Важный эксперимент по инъецированию начался в декабре 1997 г. в восточном атриуме собора. По его результатам можно было определить рациональность использования данной технологии для решения проблемы неравномерных осадок собора. Присутствие инъецированного раствора в глиняной массе было подтверждено путем отбора образцов с ненарушенной структурой из пробуренных скважин, которые использовались еще и для подтверждения ориентации растворных экранов в обрабатываемой зоне, совпадающей с теоретическими выкладками. Во время экспериментальной стадии (с 13 ноября 1997 г. по 24 января 1998 г.) было закачано 179,5 м³ раствора в юго-западную зону собора через 18 стволов. Упрощенный вид получившейся структуры показан на рис. 9.

Проект по выборочному усилению слоя глины под собором основывался на результатах всестороннего геотехнического исследования стратиграфии, гидравлических условий глинистого грунта, а также физических и механических свойств подстилающего слоя грунта. На основе уравнения (1) были определены зоны, требующие инъецирования. Инъецированные места и распространение экранов из раствора показаны на рис. 10.

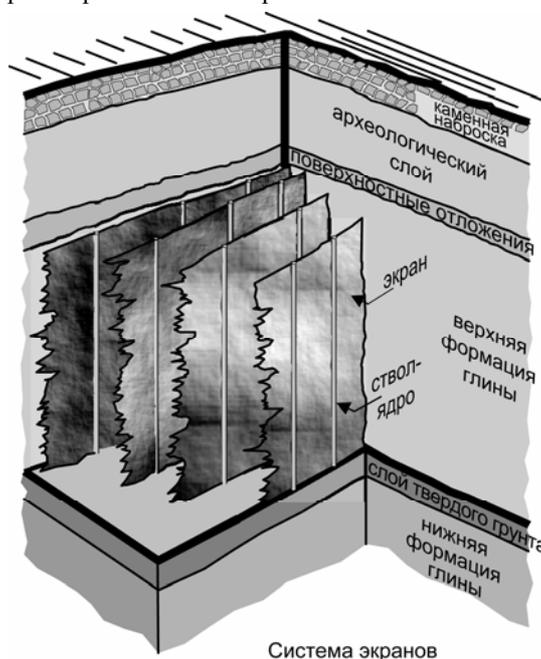


Рис. 9. Структура, сформированная в грунте посредством инъецирования

Скважины для инъецирования должны пройти сквозь толщу каменной наброски, археологического слоя и поверхностных отложений и затем – через верхний слой глины, который был проинъецирован до границы с первым твердым слоем. Оборудование и технологии, применяемые для бурения из уровня крипты, отличаются от используемых при бурении из атриума.

Бурение с уровня крипты (подземной часовни). Использовались пневматические и электрические буровые установки, которые были приспособлены к работе в очень узких проходах крипты. Некоторые из них были установлены на мобильные базы, чтобы облегчить их транспортировку. На глубине, где должны были создаваться ядра из раствора, использовались пневматические молоты, трехшарошечное долото, простые коронки и расширители скважин.

Бурение из атриума. Тяжелые бурильные установки, установленные на машины, ис-

пользовались в атриумах обеих церквей, а на некоторых участках применялись установки на лыжах. Бурение проходило так же, как и из крипты, но с несколько большим диаметром скважин.

3.3. Инъецирование растворов

На рис. 10 видно, что количество раствора варьируется от 2 до 7% в соборе и от 1 до 5% – в церкви Сагарарио. Инъецирование проводилось через 571 ядро-ствол с соответствующей конфигурацией экранов. Было пробурено 419 стволов в соборе, 111 – в Сагарарио и 41 – в здании музея; все они упирались в верхний слой глины. Такая схема была принята на основе зонирования с учетом сжимаемости грунтов основания; она была откорректирована на основе метода наблюдений.

С 8 сентября 1998 г. и до 4 июня 1999 г. проводилось инъецирование северо-западной части собора, а также северо-восточного и

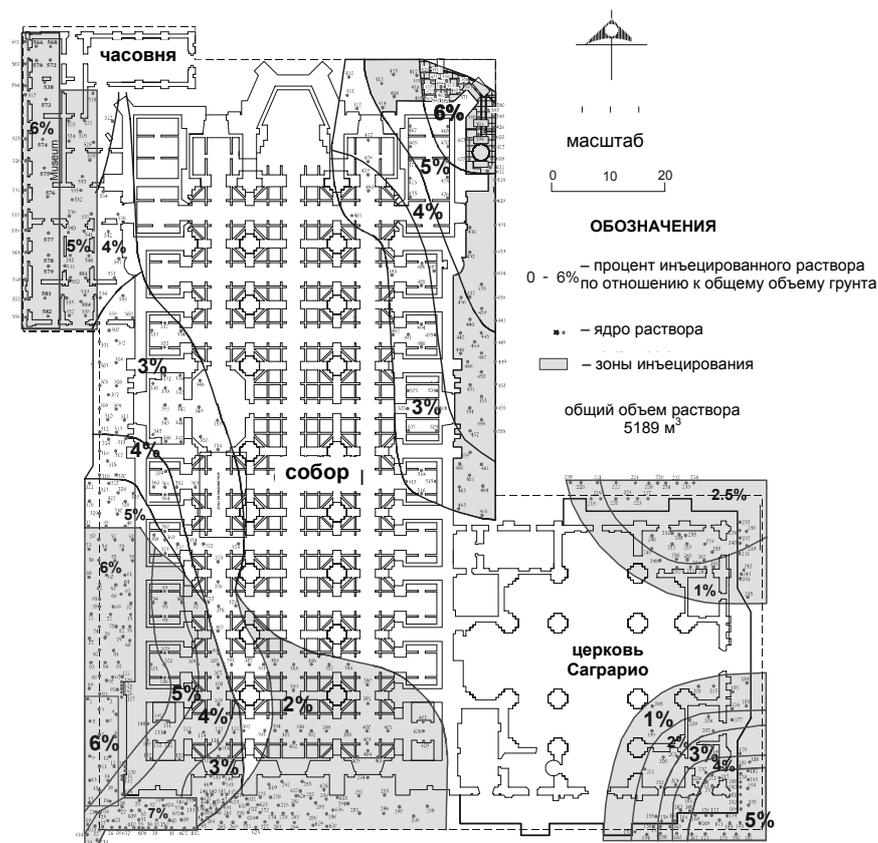


Рис. 10. Распространение инъецированного раствора

южно-восточного углов церкви Сагарио. Основание юго-западной части собора инъецировалось в два этапа с использованием 50%-ного раствора. Затем, в период с 7 июня по 9 сентября 1999 г., в южную зону был инъецирован 2%-ный раствор. Всего на инъецирование пошло 3635 м³ раствора. В 2000 г. проводились дополнительные работы в северо-восточном и юго-западном углах (976 м³). И, наконец, в конце 2001–начале 2002 г. под северо-западный угол собора было закачено 560 м³ раствора. Общий объем использованного раствора составил 5189 м³.

3.4. Последствия и эффективность упрочнения грунта

Были проведены специальные испытания в полевых условиях (пьезоконусом, dilatометром Марчетти и сейсмическим конусом) для оценки влияния инъецирования растворов на залегающие в основании собора глинистые грунты. Ниже мы даем оценку этих эффектов посредством применения пьезометров, деформационных марок, электронных отвесов (телекоординометров) и топографической съемки.

Чрезмерное поровое давление, возникшее в процессе инъецирования, рассеялось в течение семи месяцев, как видно по показаниям трех пьезометров, установленных в северо-западной части собора (рис. 11). Использовались пьезометры типа Казагранде с открытой головкой, установленные в менее пластичные слои, вкрапленные в глины.

Хотя реальное рассеяние порового давления в глинах не было измерено, измерения, представленные на рис. 11, показывают, что избыточное поровое давление и его развитие во времени влияют на реакцию грунта на инъецирование. Инъецированные растворы смещают окружающие глины, что приводит к временному увеличению порового давления и уменьшению эффективных напряжений. Это, в свою очередь, вызывает значительное уменьшение скорости роста осадок в течение несколько недель. Когда избыточное поровое давление рассеивается, осадки постепенно (в течение 6...8 месяцев) возрастают. И, наконец, уровень осадок постепенно уменьшается с развитием процесса

консолидации вследствие инъецирования, а также при наборе прочности растворами.

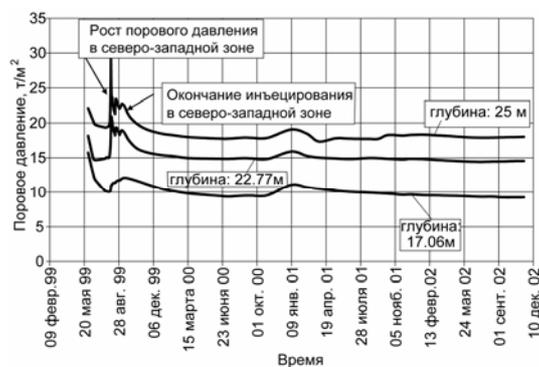


Рис. 11. Развитие порового давления во время и после инъецирования в северо-восточной части основания собора

Деформации глинистых грунтов, прилегающих к экранам из инъецированного раствора, измерялись при помощи магнитных марок, установленных в выбранных местах. На рис. 12 показано устройство этих приборов, изготовленных из соединенных сегментов жестких и гибких пластиковых труб. Трубы погружались на 100 м в грунт основания. В трубах находятся магниты, относительное положение которых определяется при помощи рулетки (1 деление = 1 мм), что позволяет измерить деформации грунта основания на различных глубинах с выбранным интервалом.

На рис. 13 приведен график развития вертикальных деформаций, которые были измерены при помощи марок, установленных в основании западной колокольни. Видно, что характер распределения деформаций в слое глины после инъецирования раствора радикально изменился. Вертикальные деформации в верхнем слое глины между отметками 11 и 40 м оказались значительно меньше деформаций, наблюдаемых в нижнем слое глины (45...49 м).

По тем же данным можно установить, что эффект инъецирования распространился только до второго слоя глины. Это видно из сопоставления характера развития деформаций на глубине 45...49 и 61...78 м.

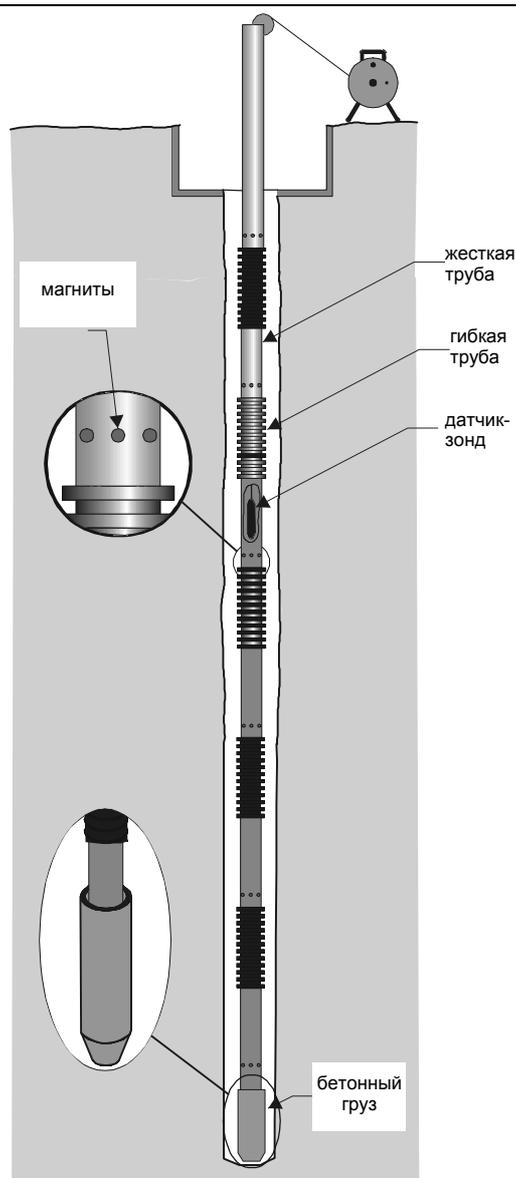


Рис. 12. Устройство для измерения деформации грунта

График на рис. 13 также демонстрирует, что второй слой глины подвергся процессам консолидации с конца 1999 г. до середины 2001 г., что стало результатом действия дополнительного веса раствора, инъецированного в вышележащие слои. Измерения дают возможность предположить, что за тот же период верхняя формация глины переместилась в вертикальном направлении, как относительно жесткий блок.

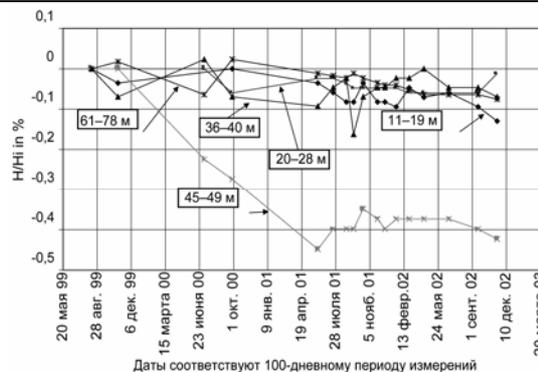


Рис. 13. Развитие вертикальных деформаций в грунтах основания западной колокольни

С марта 1996 г., т. е. примерно через два с половиной года после начала подработки (Meli and Sanchez, 1995), для мониторинга наклона и крена собора стали использоваться электронные отвесы (телекоординометры), установленные в нескольких местах собора. На рис. 14 показано развитие крена в западной колокольне в направлениях «север–юг» и «запад–восток». Положительные значения указывают на корректирующие перемещения. Первый участок кривых показывает корректирующие крены, полученные при помощи подработки до июня 1998 г. Затем, до начала 2001 г., часть этих коррекций (примерно 20%) была потеряна, когда возобновилось общее оседание грунта в городе. После этого западная башня оставалась практически стабильной более года.

Дальнейшими свидетельствами изменения поведения грунтов основания вследствие инъецирования являются результаты топографической съемки, выполненной на уровне цоколя. На рис. 15 приведены величины скорости развития осадок, полученные при нивелировании в период с 7 января по 2 сентября 1991 г. (до начала подработки), а также осадок, измеренных с февраля 2002 г. по февраль 2003 г. В верхней части рис. 15 видно, что первоначально центральная часть собора поднималась по отношению к северо-восточному углу на 16 мм в год, а по отношению к западной колокольне – на 12 мм в год. Максимальная разница – 20 мм в год – наблюдалась между центральной частью и северо-западным углом. Скорость развития осадок церкви Сагарио составляла 16 мм в год в юго-восточном

углу относительно базовой отметки около апсиды в соборе.

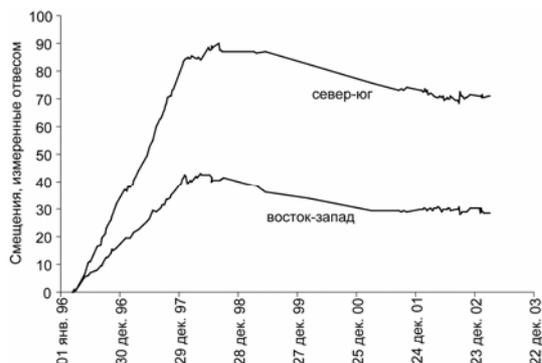


Рис. 14. Смещения, измеренные отвесом, в основании западной башни (данные Meli and Sanchez, 1995)

В нижней части рис. 15 показаны ежегодные неравномерные осадки за период с февраля 2002 г. по февраль 2003 г. Сравнение двух графиков показывает, что скорость нарастания неравномерных осадок значительно изменилась. Разница в скорости осадок между базовой отметкой и северными и западными углами сократилась с 20 и 14 мм соответственно. Устойчивость западной колокольни, подтвержденная измерениями отвесом, также отражена в нижней части рис. 15. Скорость осадок в церкви Сагарарио также резко снизилась, и ее максимальное значение теперь составляет 25% от первоначальной величины. Однако небольшое здание епископского музея в северо-западном углу церкви, инъецированное последним, все еще подвержено относительно большим неравномерным осадкам, которые должны уменьшиться после февраля 2003 г.

ВЫВОДЫ

Успех работ по коррекции кафедрального собора в городе Мехико продемонстрировал, что технология подработки является надежным и безопасным методом исправления наклона архитектурных памятников. Более того, она может быть использована для решения подобных задач, хотя, безусловно, остается потенциал для разработки более дешевых и эффективных технологий. Подработка уже применялась для уменьшения крена многих современных зданий в городе Мехико. Опыт,

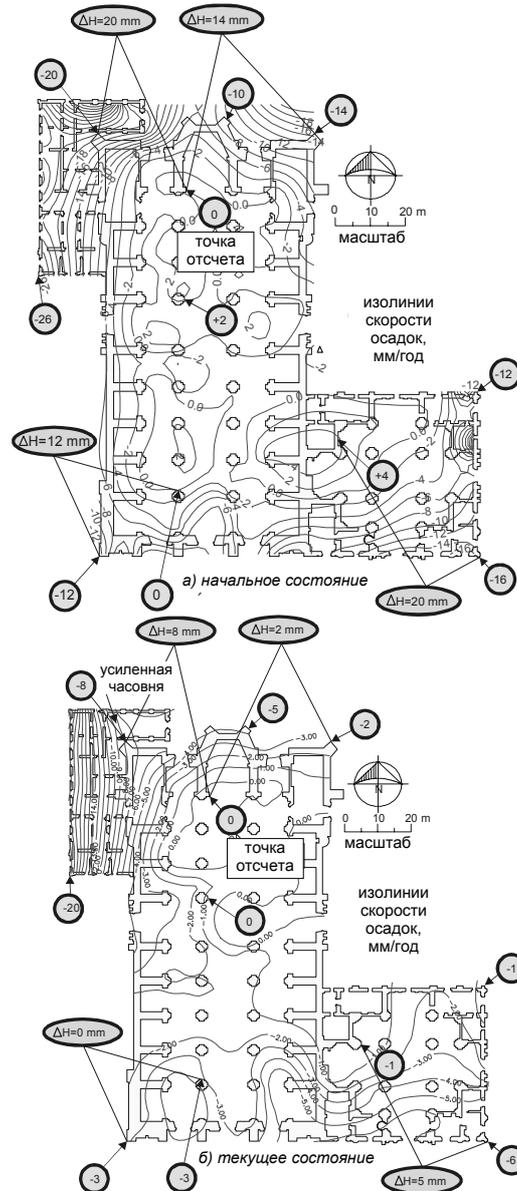


Рис. 15. Скорость осадок в начале проекта (январь – сентябрь 1991 г.) и к настоящему моменту (февраль 2002 г. – февраль 2003 г.)

полученный в ходе реализации данного проекта, стал полезным и ценным при применении этой технологии в других случаях, например при стабилизации Пизанской башни (напр., Jamiolkowski et al, 2001).

Скорость нарастания осадок в кафедральном соборе, вызванных общим оседанием грунта в регионе (верхняя часть рис. 15), была чрезвычайно велика. Для сравнения можно

сказать, что осадки развивались в 45 раз быстрее, чем осадки Пизанской башни, причем режим эксплуатации водоносного слоя сделать менее интенсивным было невозможно. Если бы не было произведено инъецирование грунта под собором, каждые 20–30 лет требовались бы новые циклы подработки (Tamez et al, 1997) в зависимости от предельного напряженно-деформированного состояния, которое определяется конструкционными возможностями кирпичной кладки и, что наиболее важно, сейсмическим риском. Поэтому требовались дополнительные исследования для решения основных проблем. Так возникло предложение усилить глинистые грунты для уменьшения скоростей нарастания неравномерных осадков, что и было применено в кафедральном соборе и в прилегающей церкви Сагарио.

Сравнение изолиний скорости осадков на рис. 15 позволяет сделать следующие выводы: 1) инъецирование позитивно изменило процесс оседания; 2) это изменение оказалось благоприятным как для собора, так и для церкви Сагарио, поскольку скорость развития неравномерных осадков значительно уменьшилась; 3) неравномерные осадки по-прежнему присутствуют, но в обоих зданиях есть тенденция к их уменьшению. Тем не менее потребуется определенное время для полной оценки положительных результатов избирательного усиления грунта, что можно сделать при помощи инструментальных наблюдений.

Избирательное укрепление грунта является превентивной мерой, противоположной подработке, которая была применена как коррективный способ для уменьшения неравномерных осадков. В работе показано, что оба метода могут последовательно применяться в

зависимости от конкретных инженерно-технических условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chambosse, G. and Otterbein, R. 2001. State of the art of compensation grouting in Germany. *Proc. XVth Int. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Engng.*, Istanbul, Turkey, Vol. 2, pp. 1511-154.
2. Jamiolkowski, M. 2001. The leaning tower of Pisa: End of an Odyssey, *Proc International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Istanbul, Vol/ 4, pp. 2979-2996
3. Meli, R. and Sánchez, R. 1995. Diagnóstico estructural, Chapter IV in: *Catedral Metropolitana: corrección geométrica, informe técnico*, Mexico City: Asociación de amigos de la Catedral Metropolitana de México, A. C., pp. 141-188.
4. Ovando-Shelley E., Tamez E. and Santoyo E. 1996. Geotechnical aspects for underexcavating Mexico City's Metropolitan Cathedral. Main achievements after three years. *Proc. Int. Symposium on Geotechnical Engineering for the Preservation of Historical Sites*, University of Naples, Pre-prints Vol, pp 456-465
5. Ovando-Shelley E. and Manzanilla L. 1997. Archaeological interpretation of geotechnical soundings in the Metropolitan Cathedral, Mexico City, *Archaeometry*, Vol 39, No. 1, pp. 221-235.
6. Ovando-Shelley, E., and Santoyo, E. 2001. Underexcavation of buildings in Mexico City: the Case of the Metropolitan Cathedral and the Sagrario church. *Proc. ASCE, Journal of Architectural Engineering*. Vol 7, No. 3, pp. 61-70.
7. Tamez, E., Ovando-Shelley, E. & Santoyo, E. 1997. Underexcavation of Mexico City's Metropolitan Cathedral and Sagrario Church. Special Invited Lecture, *Proc., XIVth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, Vol. 4, pp. 2105-2126