

УДК 624.131.438

А.В. Корчак, А.И. Мороз

**К ВОПРОСУ О МИНИМИЗАЦИИ СНИЖЕНИЯ
ПРИРОДНЫХ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ
ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА ПРИ УСТРОЙСТВЕ
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КОТЛОВАНОВ
В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ**

После разгрузки песка и на последнем ее этапе происходит массовое образование дефектов, характеризуемое регистрацией сигналов акустической эмиссии, которая свидетельствует о разрушении образованной при формировании его напряженно-деформированного состояния структуры. Поэтому при разработке котлованов для минимизации эффекта разуплотнения грунта необходимы активные методы крепления.

Ключевые слова: разгрузка, песок, акустическая эмиссия, разуплотнение, котлован, активные методы крепления.

Освоение подземного пространства крупных городов, связанное в основном с развитием их инфраструктуры, ведется различными способами, в том числе и открытым с устройством котлованов. Разработка породы при сооружении котлована является техногенным воздействием, т.е. вторжением в сформировавшееся природное напряженно-деформированное состояние (НДС) вмещающего массива, в процессе которого существовавшие ранее начальные напряжения на контуре выработки снимаются. Этот фактор, связанный с нарушением начального НДС породного массива, является причиной изменения сложившегося природного поля напряжений и деформаций в окрестности поверхностей обнажения [1]. Поэтому при устройстве котлованов, особенно при их значительной глубине, для сохранения существующей застройки требуется специальное крепление их бортов, ограничивающее горизонтальные перемещения ограждающей конструкции, направленное на мини-

мизацию дополнительных деформаций зданий и сооружений в зоне влияния строительства.

Тем не менее, при строительстве новых объектов не удается полностью избежать деформаций массива [2]. При этом наблюдаемые перемещения дна котлована после разработки породы, а также его бортов рассматриваются геотехниками просто как деформации, обусловленные вырезом, т.е. только удалением материала по контуру котлована без разрушения ее структуры. Фактически такие предпосылки относят породу к образованиям, инертным к истории происхождения НДС, и ненапряженным после разгрузки.

Однако, как показывают многочисленные исследования, особенно в последнее время, сформировавшейся под воздействием различных природных факторов породе присущи особенности, одна из которых состоит в том, что при снятии действовавших внешних силовых воздействий (разгрузке) происходит не полная реали-

зация накопленной энергии упругих деформаций, во всяком случае, в момент окончания разгрузки. Факты остаточных напряжений в породах, характерные для самонапряженного состояния [3], обнаруживали многие ученые (Л.Н. Репников, 1963; Н.П. Влох и др., 1972; С.В. Ржевская и Р.Г. Петроченков, 1984; А.Н. Ставрогин и О.А. Ширкес, 1986, С.В. Лавриков и А.Ф. Ревуженко, 1991 и др.) [4].

Эта остаточная часть может достигать 30 % от всей энергии, затраченной на деформирование породы, и высвободиться лишь по истечении некоторого времени [5]. Авторами на физическом образце в виде шероховатых стержней, стянутых упругой нитью, показано, что реализация упругой энергии после разгрузки может происходить с изменением структуры модели грунтового массива. Наличие в грунте остаточных напряжений позволило им сформулировать концепцию грунтового массива как активной среды с внутренними источниками и стоками энергии. Однако еще раньше, в 1950 г. [6] С.С. Давыдов предложил учитывать в расчетах горизонтальные составляющие объемных сил массива, поскольку предполагалось, что активный слой до его разуплотнения помогает креплению.

Вместе с тем, несмотря на отмеченные факты, многие вопросы, в том числе стабильности механических свойств при разгрузке остаются практически открытыми.

С учетом вышеизложенного были продолжены исследования эффекта остаточных напряжений в породных массивах в условиях компрессии – декомпрессии. Результаты экспериментальных исследований [4, 7] изменения НДС песчаного грунта показали, что сразу же после разгрузки песка происходят не просто деформации

упругого последствия, а наряду с ними образуются многочисленные дефекты. При трактовке этих результатов испытаний отметим, что в теории упругости [8] и сопротивлении материалов не ставится ограничения на количество потенциальной энергии, и сколько бы материал ее не накопил, она должна вся реализоваться при разгрузке. Наблюдаемое упругое последствие свидетельствует о том, что энергия упругих деформаций реализуется не мгновенно, а по истечении некоторого времени после разгрузки. Эти ограничения упругим деформациям в ее реализации, являющиеся показателем наложения внутренних напряжений, означают наличие резервов в несущей способности породы, во всяком случае, в момент окончания разгрузки.

Появление дефектов обнаруживали с помощью разработанного комплекса аппаратуры, регистрирующей возникновение и распространение сигналов акустической эмиссии (АЭ). Известно, что АЭ – это выделение энергии звуковых колебаний в процессе образования дефектов в материале (грунте), причем каждое возникновение даже микродефекта сопровождается излучением накопленной ранее энергии в различных формах, в том числе и АЭ, например [9].

Анализ результатов выполненных экспериментов показал, что после полного снятия нагрузки происходило массовое образование дефектов в структуре песка, сопровождавшееся выделением сигналов АЭ и деформаций упругого последствия. На оси деформаций (рис. 1) эти перемещения после разгрузки показаны толстой линией с окончанием в виде стрелки. Сразу же после выключения пресса аппаратура измерительного

комплекса регистрировала поступление

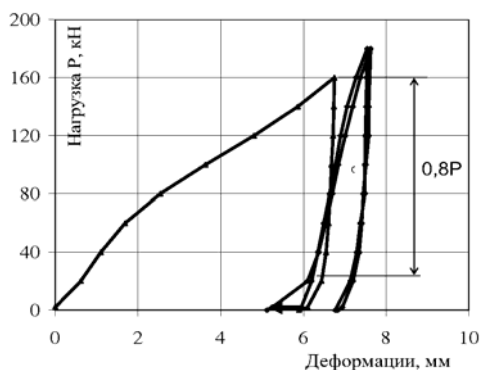


Рис. 1. Компрессионные зависимости в циклах нагрузка - разгрузка - выдержка во времени - повторная нагрузка, полученные при лабораторных исследованиях несвязной породы (песка)

сигналов АЭ. Максимальное количество импульсов наблюдалось в момент полного снятия нагрузки, затем интенсивность АЭ уменьшалась и прекращалась в интервале времени 24...27 мин, после чего состояние или стабилизировалось или новые сигналы АЭ были ниже порога чувствительности аппаратуры, что свидетельствует о затухающем характере АЭ.

Образование дефектов приводит к тому, что при разгрузке накопленная энергия упругих деформаций реализуется с разрушением сложившейся структуры, преодолевая ее сопротивление. Такое разупрочнение грунта после снятия внешних силовых воздействий имеет своим следствием уменьшение модуля деформации на начальном этапе приложения повторной нагрузки по истечении этого времени по сравнению с модулем деформации грунта, который получают при мгновенном повторном нагружении, а также снижение механических свойств.

Результаты дальнейших исследований интенсивности АЭ в зависимости от величины снимаемой нагрузки

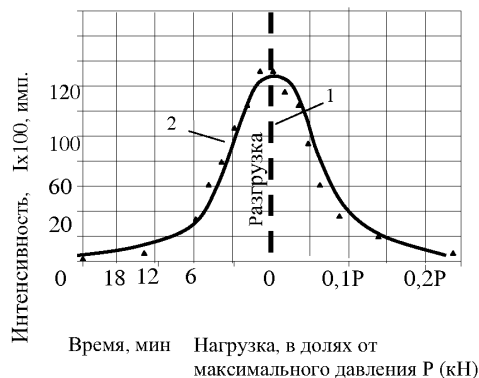


Рис. 2. Изменение интенсивности сигналов АЭ на последнем этапе снятия внешней нагрузки (1) и после разгрузки (2) несвязной породы (песка)

показали, что образование дефектов происходит также и на последнем этапе процесса разгрузки. В опытах производилась не полная разгрузка, позволившая установить, что сигналы АЭ начинают поступать с уровня 80 – 83 % от нагрузки сжатия P песка. Диапазон нагрузок (от P до $0,8 P$), в котором не регистрировали сигналов АЭ, показан на рис. 1.

Импульсы сигналов АЭ начинали регистрировать только после того, когда произведена частичная разгрузка и остается пригруз, равный $0,2 P$ (рис. 2). В правой части этого графика приведена интенсивность сигналов АЭ с уровня пригруза, равного $0,2 P$, которая увеличивается (показана цифрой 1) и достигает максимума при полной разгрузке. В средней части графика пунктирной линией показано нулевое значение нагрузки, соответствующее полной разгрузке. Цифрой 2 в левой части графика отмечено дальнейшее изменение сигналов АЭ,

регистрируемых после полного снятия внешней нагрузки, уменьшающееся с течением времени вплоть до полного исчезновения сигналов АЭ примерно через 0,5 часа.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что для минимизации изменения первоначальной структуры массива и его прочностных свойств на практике необходимо применять способы, не допускающие полной разгрузки породы.

Для объяснения явления последействия было использовано предложение [9] относиться к грунту как пространственной конструкции – ферме, наподобие которой деформируется при нагружении структурная сетка грунта; по мнению авторов, она, «деформируясь, продолжает выполнять функции несущей конструкции, поскольку отдельные элементы фермы не порваны». Выполненный расчет [4] простой фермы – однократно статически неопределимой системы, в качестве аналоговой модели грунта, для адекватного описания процесса его деформирования показал, что при сжатии происходит образование двух систем напряжений: пластических и упругих. Возникновение в наиболее нагруженных стержнях фермы пластических деформаций приводит к тому, что при разгрузке эти элементы первыми возвращаются в нулевое состояние, после чего меняют свою полярность из-за воздействия на них работающих в упругой стадии элементов, которые начинают их растягивать. В результате после разгрузки ферма не возвращается в свое исходное состояние и приходит в самонапряженное состояние, т.е. в состояние, характеризующее остаточными напряжениями.

Аналогичное явление с точки зрения возникновения остаточных усилий будет иметь место в статически

неопределимых системах, имеющих кратность больше единицы. При нагружении пространственной конструкции с огромным количеством узлов (сотни тысяч, миллионы) образуется новая структура, которая, не будет адекватной первоначальной структуре до нагружения. Таким образом, нагружение одно или многократно статически неопределимой системы, вызывающей появление хотя бы в одном элементе пластических деформаций, приводит к образованию остаточных напряжений при разгрузке, т.е. причина явления связана с предыдущей историей формирования НДС конструкции.

То же происходит и с грунтом, поскольку существует, как отмечал Н.М. Герсеванов [10], аналогия, если стержни заменить участками массива. Нагружение приводит к тому, что одни области массива переходят в пластическое состояние, другие – в упругие. При снятии нагрузки указанные области начинают «работать» по своим законам, взаимодействуя между собой и внося свой вклад в результирующее НДС. Это проявляется в том, что в результате реализации упругих деформаций создаются условия, способствующие построению более компактной структуры в результате перемещения части элементов в более доступные зоны среды. Поскольку прочность песка на растяжение практически равна нулю, то при разгрузке начинает происходить разрушение связей песка, а остающиеся в течение короткого периода времени после снятия внешних силовых воздействий напряжения разных знаков «обязаны» тому, что угол внутреннего трения песка нулю не равен.

Разрушение каждой отдельной связи представляет собой образование дефекта, который является генератором волнового пакета механических

колебаний, распространяющихся по объему среды до ее поверхности и являющихся индикатором возникшего дефекта. Эти колебания в виде сигналов АЭ в режиме быстрой разгрузки и регистрировала в опытах собранная в блок аппаратура.

Графики показывают, что величина $1/4$ от ранее действовавшей нагрузки может служить гарантированным ориентиром для разработки мероприятий по предотвращению разрушения образовавшейся структуры, например, за счет приложения пригруза.

Несмотря на то, что полученные при испытаниях в режиме сжатия – разгрузки результаты относятся к вертикальным нагрузкам, тем не менее, эти данные могут быть привлечены для объяснения явлений, происходящих при креплении бортов котлована с гибкими или жесткими подпорными стенами.

Традиционно считается, что устроенное во вмещающем массиве ограждение (свай, «стена в грунте» и др.) до разработки котлована является жесткой конструкцией. С точки зрения геотехники это означает, что крепление в этот момент не оказывает влияния на находящиеся вблизи строительства объекты. Такие предположения нашли свое отражение в современных расчетах (в программных комплексах WALL-3, PLAXIS 2D Foundation и др.) в виде учета только поэтапной экскавации грунта из котлована.

Однако технологические особенности устройства крепления, которые остались вне поля зрения исследователей, могут оказывать существенное влияние на изменение НДС массива вблизи выработки. Подтверждением являются, например, результаты мониторинга «стены в грунте» на площадке строительства Турецкого торгового центра в центре г. Москвы,

которые показали, что большую часть вертикальных осадок близлежащие здания претерпевали не в процессе экскавации грунта, а при устройстве ограждения и анкеров [2]. При этом деформации грунтового массива происходили при устройстве «стены в грунте» на расстоянии до 10 м от оси стены, причем осадки зданий, расположенных на расстоянии 3 м от стены, достигали 14 мм, на расстоянии 5...8 м – 4...5 мм. Аналогичные процессы наблюдаются и при бурении скважин для устройства крепления из свай. Это дает основание сделать вывод о том, что процессы разрушения структуры грунта начинают происходить уже на стадии сооружения ограждения: при бурении скважин для устройства свай, при устройстве захваток «стены в грунте» и т.д., т.е. разгрузка начинается до разработки грунта в котловане. В процессе устройства сваи происходит изменение напряжений, как в торце забоя, так и по контуру выработки. В результате после бурения скважины в пределах контура будущей сваи природные напряжения практически снимаются.

Кроме того, после бетонирования сваи извлечение обсадной трубы воздействует на стенки скважины, т.е. на систему эффективных напряжений, и приводит к тому, что примыкающий к ее поверхности грунт начинает смещаться в сторону скважины. Бетон, поступая в жидком состоянии, начинает разжижать грунт в области влияния, уменьшая эффективные напряжения, которые воспринимают основную силовую нагрузку. В результате находящиеся в зоне влияния строительства здания претерпевают дополнительные осадки.

В качестве подтверждения являются многочисленные данные практики, например, мониторинга технического состояния зданий в районе

метро «Сокол» при строительстве транспортной развязки. На протяжении двух лет строительства наблюдалось незначительные прира-

щения дополнительных осадок дома № 71 (рис. 3).

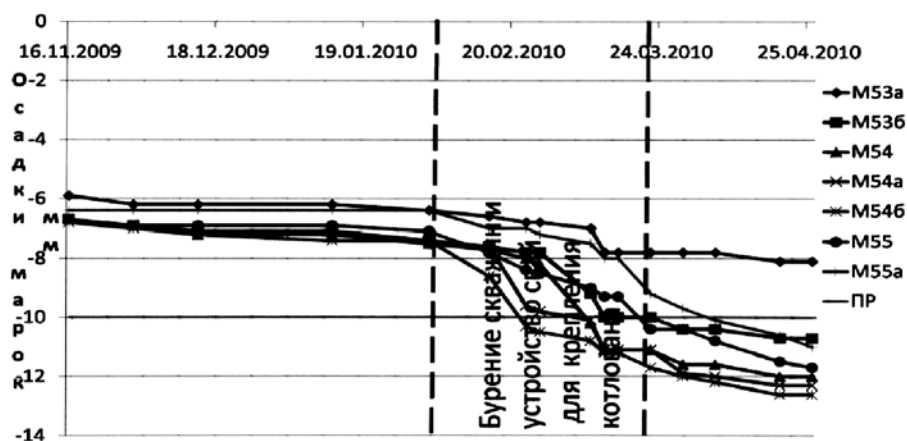


Рис. 3. Влияние устройства ограждения котлована вблизи фасадной стены здания на ее осадки. M53...M55 – номера геодезических марок, установленных в цокольной части здания

В феврале 2010 г. вдоль главного фасада на расстоянии 7 м начали бурение скважин \varnothing 800 мм глубиной 11,5 м для устройства ограждения коллектора из свай. Несмотря на зимние отрицательные температуры, наличие подвального этажа и глубину заложения подошвы фундаментов более 4 м, в этой части здания появились приращения дополнительных осадок практически без отставания от времени бурения (на рис. 3 этот диапазон приращений выделен пунктирными линиями).

Вместе с тем, и после набора прочности бетоном ограждение на этом этапе строительства еще является пассивным элементом крепления. Оно вступит в работу при разработке грунта в котловане и появлении деформаций. Поэтому наиболее эффективным способом может быть приложение пригруза до начала разработки грунта. Если к этому ограждению до устройства котлована при-

ложить противодействующее усилие, направленное в обратную от котлована сторону на нейтрализацию активного давления грунта и деформаций, то оно будет компенсировать частично нарушенную при сооружении крепления структуру грунта. Поле напряжений, обусловленное пассивной реакцией ограждения, будет вносить существенную корректировку в образование результирующего поля напряжений, что приведет к минимизации снижения прочностных свойств грунта.

Следует отметить, что аналогичные методы успешно применяются при строительстве подземных сооружений закрытым способом, однако только после разработки устойчивой породы. Например, при сооружении односводчатой станции метро «Тимирязевская» в г. Москве монтажа в выработке обделки из блоков и предварительного нагнетания в несколько этапов за обделку инертного и связую-

шего материалов выполнялся распор сборной железобетонной обделки в кровельную часть выработки с помощью домкратов Фрейсине, устанавливаемых в замковом (разрывном) блоке обделки. Это позволило выбрать зазоры между обделкой и массивом из известняка и перевести обделку в

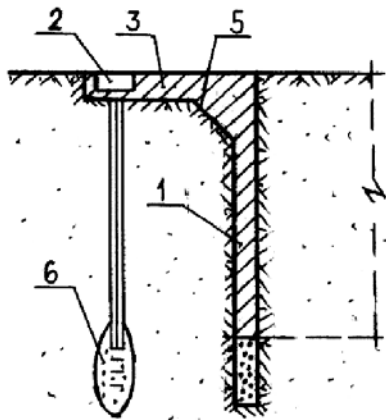


Рис. 4. Крепление котлована: ограждающая конструкция (1), воротник (3), усиление (5) места соединения, анкер (6) с замком (2)

напряженное состояние, исключив образование дефектов в породном массиве, которые регистрировали с помощью разработанной аппаратуры АЭ [4].

Отличие состоит в том, что наиболее эффективным решением крепления котлованов может явиться создание изгибающего момента к ограждению до начала разработки грунта. Борты котлована подвержены снятию начального давления, что приводит к ослаблению и бокового давления. В результате реализации упругих деформаций нарушается первозданная природная структура, образовавшаяся под давлением, при разгрузке грунт «рыхлят». Это раз-

рушение происходит тем сильнее, чем глубже котлован, поскольку величина упругих деформаций возрастает с глубиной. Подпор при создании выработок сводит к минимуму влияние снятия ранее существовавших природных давлений на контуре котлована.

Примером может служить выполняемое до разработки грунта крепление «стена в грунте» с устройством выступающего в сторону от котлована «воротника», соединенного с верхней частью ограждения, который образует жесткую Г-образную конструкцию [11], с пригрузом. Пригруз может быть выполнен также установкой и соединением с воротником анкеров в вертикальной плоскости и приложения к ним усилий стягивания (рис. 4).

Натяжение анкеров, создаст изгибающий момент полярности, противоположной активному снимаемому начальному давлению, и он начнет прижимать крепление и, соответственно, грунт с не разрушенной структурой в сторону борта будущей выработки, который будет оказывать пассивное сопротивление. Увеличивая усилие натяжения, можно зарегистрировать момент, когда стенка получит перемещение в сторону борта котлована, означающее вступление крепления в работу. После этого начинается разработка грунта в котловане. Для регистрации начала перемещения могут быть использованы известные инструментальные методы.

Вывод

При разгрузке песка в результате реализации упругих деформаций взаимодействие областей массива с разным напряженным состоянием приводит в течение некоторого времени после разгрузки к локальному или полному нарушению сформиро-

вавшейся структуры. Это сопротивление разгрузке определяет резервы несущей способности массива. Для минимизации снижения механических свойств и природной структуры вме-

щающему массиву необходима «помощь» в виде активных методов крепления, например, приложения при груза и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баклашов И.В., Картозия Б.А.* Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1992.
2. *Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А.* Опыт проектирования и мониторинга подземной части Турецкого торгового центра, ОФимГ. – 2004. – № 5.
3. *Картозия Б.А., Мороз А.И.* Возникновение самонапряженного состояния горной породы при разгрузке // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГУ, 2001. – № 4.
4. *Мороз А.И.* Самонапряженное состояние горных пород. – М.: Изд-во МГУ, 2004.
5. *Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф.* Об одной экспериментальной модели горной породы // ФТПРПИ. – 1991. – № 4.
6. *Давыдов С.С.* Расчет и проектирование подземных конструкций. – М.: Стройиздат, 1950.
7. *Мороз А.И.* Изменение напряженно-деформированного состояния несвязного грунта после разгрузки. В сб. научных трудов НИИОСП им. Н.М. Герсевича. Выпуск 99. – М.: Изд-во «ЭСТ», 2008.
8. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости / Перевод с англ. – М.: Наука, 1979.
9. *Воробьев А.А., Завадовская Е.К., Сальников В.Н.* Изменение электропроводности и радиоизлучения горных пород и минералов при физико-химических процессах в них // ДАН СССР. – 1975. – Т. 220. – № 1.
10. *Герсевич Н.М., Польшин Д.Е.* Теоретические основы механики грунтов и их практическое применение. – М.: Стройиздат, 1948.
11. *Патент РФ № 2327008.* Крепление бортов котлована / Картозия Б.А., Репников Л.Н., Сандуковский А.Э. и др. – БИ, 2008. – № 17. **ПАТ**

Коротко об авторах

Корчак А.В. – доктор технических наук, профессор, ректор Московского государственного горного университета, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru
Мороз А.И. – кандидат технических наук, зам. начальника отдела НИИОСП им. Н.М. Герсевича, moroz@niiosp.ru

