

УДК 624.131.438

А.В. Корчак, А.И. Мороз

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРИГРУЗА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОГРАЖДЕНИЯ БОРТОВ КОТЛОВАНА

Представлены результаты экспериментальных исследований на модели по увеличению устойчивости бортов котлована за счет пригруза в пределах призмы обрушения.

Ключевые слова: модель борта котлована, лоток, пригруз, горизонтальные перемещения, устойчивость.

В современных условиях плотной городской застройки все меньше остается свободных площадей, что приводит как к увеличению масштабов высотного строительства, так и к интенсивному освоению подземного пространства, при этом границы осваиваемых относительно «свободных» территорий оказываются максимально приближенными к эксплуатируемым объектам. Это требует при строительстве подземных сооружений открытым способом в стесненных городских условиях применения надежных методов крепления бортов котлована, среди которых широкое распространение получила распорная крепь. С ее помощью в крупных городах построены десятки километров тоннелей метрополитенов, транспортных развязок и других подземных сооружений [1]. Вместе с тем, элементы распорных систем (распорки, расстрелы, раскосы, подкосы и др.) загромождают внутреннее пространство, приводят к необходимости попарусного удаления распорок, увеличивают сроки строительства и стоимостные затраты, а в ряде случаев сильно затрудняют ведение строительного-монтажных работ внутри котлована.

Эти факторы требуют применения схем крепления котлованов без распорок. Однако традиционные конструкции крепления без распорок и анкеров, например, шпунтовое ограждение или «стена в грунте» не являются абсолютно жесткими. Вместе с вмещающим массивом они претерпевают значительные деформации при разработке котлована, оказывая негативное влияние на техническое состояние близлежащих зданий и сооружений. Факты таких случаев приведены в [2]. Ограждение котлована оказывается эффективным только в случае, если оно сводит к минимуму горизонтальные деформации бортов в сторону котлована.

Вместе с тем, опыт определения горизонтальных перемещений верха ограждения в сторону котлована показал, что и распорное крепление, если оно выполнено с отступлением от технического регламента, может оказаться малоэффективным. Подтверждением являются результаты данных мониторинга с помощью измерительных баз [3] горизонтальных перемещений ограждения котлована глубиной 8 м, выполненного из двутавров, помещенных в пробуренные скважины, при строительстве жилого дома в г. Москве на 10-й Парковой

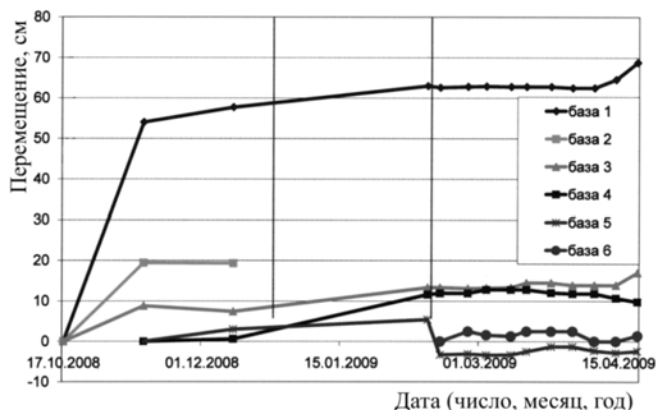


Рис. 1. Горизонтальные перемещения верха шпунтового ограждения при разработке котлована по данным мониторинга с помощью уклономера

улице в период 2008 – 2009 гг., приведенные на рис. 1.

Регистрация перемещений выполнялась с помощью модернизированного уклономера заводского изготовления, который после усовершенствования за счет оснащения его дополнительными элементами, основными из которых являются самоцентрирующиеся конические втулки, оптическое устройство с подсветкой, а также измерительная база с опорами, позволил в полевых условиях определять приращения угловых деформаций конструкции ограждения с точностью $1 \cdot 10^{-4}$ рад.

Такая точность достигнута за счет оснащения прибора дополнительными элементами, основными из которых являются опорная база, конические опоры, оптическое устройство. Самоцентрирующиеся конические втулки, предложенные и используемые в способе мониторинга дефектов [4], обеспечивают установку уклономера при повторных измерениях точно в одно и то же положение на опорную базу без люфтов. Оптическое устройство с подсветкой позволяет устанавливать воздушный пузырек в положение до

границы риски и следить за его перемещениями между мерными рисками, расположенными в пузырьковой камере, с пятикратным увеличением по сравнению с прибором заводского изготовления в любое время суток.

Анализ зарегистрированных данных показал, что горизонтальные перемещения верха ограждения котлована происходили в три этапа. В первом этапе наблюдения, когда обвязочный пояс еще не был замкнут, а грунт разрабо-

тан на всю глубину, произошли перемещения шпунтового ограждения более, чем на 50 см. В результате в здании, находящемся в зоне влияния строительства, появились многочисленные трещины. В дальнейшем, после того, как был замкнут обвязочный пояс и установлены дополнительные расстрелы и подкосы, регистрировали незначительные перемещения, которые были обусловлены сопутствующими факторами: температурными, технологическими (установкой расстрелов, демонтажем поясов и др.) и т.д.

Таким образом, и традиционные методы крепления, предназначенные для обеспечения устойчивости бортов котлована, необходимо совершенствовать. Одним из видов совершенствования может быть разработка и применение активных способов, направленных на минимизацию изменения начального напряженно-деформированного состояния (НДС) массива при устройстве котлованов и сооружении подземных объектов и, в частности, развитие способа «стена в грунте» с воротником [5].

Необходимость применения активных методов крепления в условиях городской застройки обоснована в [2], где показано, что раздельно связанная порода (песок) в конце цикла разгрузки приходит в самонапряженное состояние, которое раньше было известно для осадочной обломочной сцементированной породы [6, 7]. Результаты комплексного исследования этого вопроса, отраженные, в том числе и [2, 6...8], позволили сделать вывод о том, что порода в самонапряженном состоянии из-за частичного связывания упругой энергии обладает резервом несущей способности, причем ограниченное время. С другой стороны, остаточные напряжения, характерные для самонапряженного состояния, в том числе и растягивающие, возникающие в результате взаимодействия структурных элементов породы при снятии внешних силовых воздействий, являются потенциальной причиной образования дефектов и снижения прочности породы. И, если период «жизни» самонапряженного состояния осадочной породы с последующей цементацией [8], определяющий резервы ее несущей способности, может достигать нескольких месяцев после снятия внешних сил, то длительность процессов разрушения структуры песка при разгрузке исчисляется максимум часами (временем разгрузки и последствием) [2, 8]. Следует отметить, что именно в таких грунтовых условиях московского региона в раздельно связанной породе приходится обеспечивать сохранность существующих объектов в зоне влияния возводимых котлованов.

Основная идея повысить несущую способность бортов котлована при разработке активных методов крепления состояла в выполнении ряда мероприятий в пределах потенциаль-

ной призмы обрушения по различным схемам. В частности, была выполнена экспериментальная проверка устойчивости ограждающей конструкции с помощью приложения к верху стены ограждения котлована изгибающего момента противоположного по знаку активному снимаемому начальному давлению до разработки грунта. Исследования проводили в лабораторных условиях на модели в лотке. В качестве критерия рассматривалось приращение перемещения стенки в сторону котлована. В опытах определялась величина приложения принудительного горизонтального усилия, провоцирующего начало перемещения ограждения после откопки котлована.

При поиске решения этой задачи выбраны самые неблагоприятные условия работы защитного ограждения котлована, а именно, подпорная стенка выполнена не только без защемления ниже подошвы в массив, но и шарнирно опиралась на дно котлована. В качестве грунта, слагающего борт котлована, применяли сухой калиброванный песок (сцепление равно нулю) фракции 1,5...2 мм. Предварительно были выполнены расчеты по определению активного давления грунта потенциальной призмы обрушения, величины изгибающего момента, необходимого для обеспечения устойчивости бортов котлована, сил трения песка о лоток, оказавшийся равным 14° , которые удерживают призму от обрушения, и другие вспомогательные вычисления.

Были исследованы схемы жесткого закрепления (рис. 2, а) и соединения с помощью шарнира (рис. 2, б) верхней части ограждения с элементом, через который пригруз передавался на потенциальную призму обрушения.

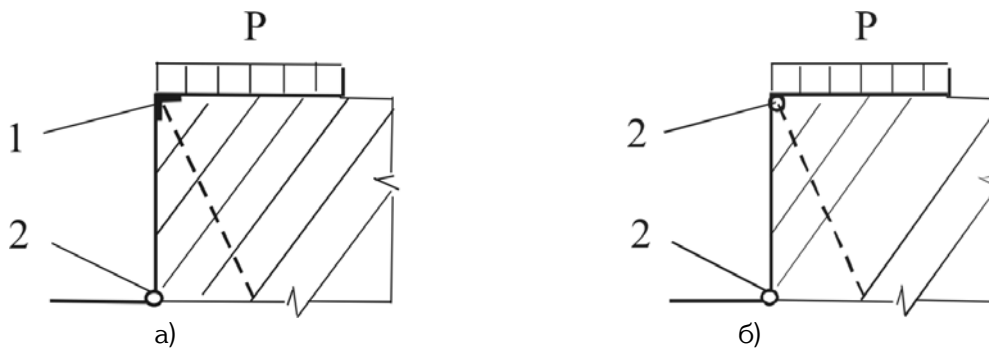


Рис.2. Схемы соединения ограждения и площадки с пригрузом: 1 – жесткое закрепление, 2 – шарнирное соединение

Первая схема предполагала использование кронштейна, жестко закрепленного на уровне дневной поверхности ограждения, и приложение на конце кронштейна нагрузки для создания в месте соединения его со стенкой изгибающего момента, обеспечивающего создание предварительного давления на планируемый борт котлована в направлении, противоположном к активному давлению грунта. Очевидно, что реализация этой схемы приводит к дополнительному давлению на грунт призмы обрушения в вертикальном направлении, что является обстоятельством, улучшающим условия работы подпорной стенки как ограждающей конструкции, обеспечивая в тоже время горизонтальное давление на борта котлована. Применение идеи приложения к верху стены ограждения в пределах потенциальной призмы обрушения изгибающего момента противоположного знака хорошо демонстрируется на следующем опыте (рис. 3).

Методика проведения опыта. Сначала собиралось ограждение с распоркой, имитирующей не изъятый грунт в будущем котловане. Затем засыпался песок с послойным с уплотнением для моделирования будущего борта котлована. В результате ограж-

дение оказывалось зажатым между распоркой (слева) и грунтом (справа). Собранный стенка с уплотнением и опиранием в нижней ее части по линии, обеспечивающей шарнирное соединение в уровне дна котлована без трения, распиралась в горизонтальном направлении в лоток вверху с помощью распорки. Наглядность опыта заключается в том, что снятие распорки приводило к началу поворота ограждения с последующим падением его в котлован, причем в первый момент этого процесса частицы песка в призме обрушения перемещались с разными скоростями в пограничном слое. Конструкция стыка ограждения со стенкой котлована обеспечивала свободный поворот без трения этого ограждения между двумя стенками лотка и без нарушения “герметизации” по всей высоте ограждения. При этом уплотнение точно и мягко следовало за поверхностью стенки, обеспечивая герметизацию (песчинки не просыпались в котлован) даже в процессе обрушения борта котлована.

Далее на горизонтальную поверхность песка в пределах призмы обрушения устанавливали кронштейн (рис. 3, а), на который помещали две гири (рис. 3, б) по 2Н каждая (активное

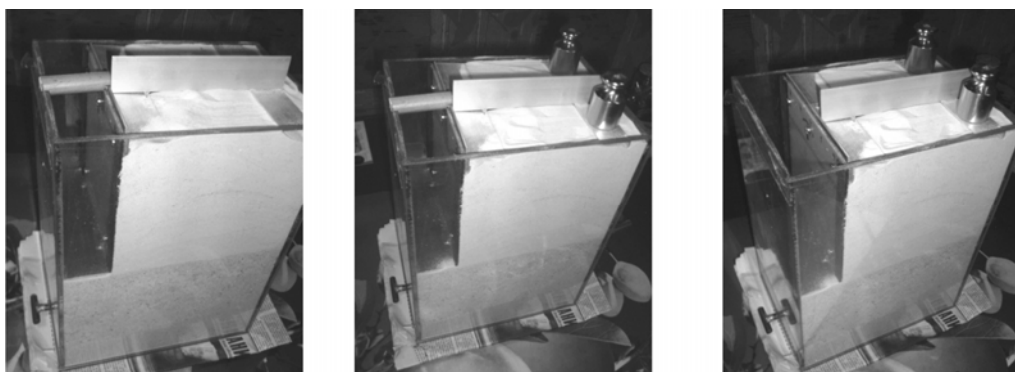


Рис. 3. Моделирование устойчивости борта котлована: а) – стенка с распоркой, б) – установки пригруза с помощью гирь, в) – снятие распорки

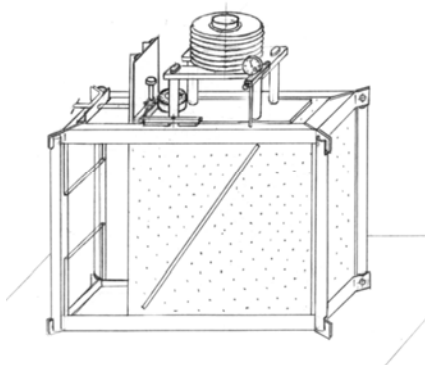
давление грунта, полученное по треугольной эпюре, создает нагрузку в 4,5Н). Установка нагрузки привела к тому, что ширина “траншеи” увеличилась на 0,2 мм, при этом распорка ослабла (начала “болтаться”). Контрольная проверка показала, что распорка снова оказывается зажатой, если гири убрать с поверхности кронштейнов. Таким образом, конструкция, включающая ограждение, горизонтальную площадку, конструктивно связанную с ограждением, пригруз на горизонтальной поверхности борта котлована за счет изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) приводит к повышению устойчивости бортов котлована (рис. 3, в).

Следующим шагом в исследовании явилось применение горизонтальной площадки в пределах призмы обрушения, на которую прикладывали вертикальную нагрузку (пригруз), расположенную в пределах призмы обрушения с двумя вариантами соединения ее с ограждающей конструкцией (жесткое и шарнирное) в специально изготовленном лотке. Его конструкция обеспечивала отсутствие зазора между моделью ограждения и боковыми стенками лотка практически без трения. Стенка была выполнена из металлического листа толщи-

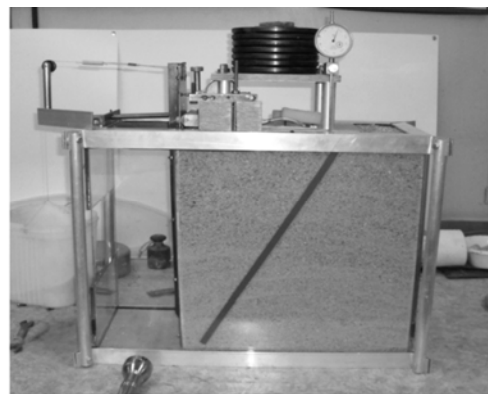
ной 2 мм. В качестве пригруза применяли набор металлических дисков весом 10Н каждый.

Лоток оснащали измерительными приборами, обеспечивающими регистрации начального и последующих состояний ограждения, а также горизонтальной площадки. В ряде случаев для дублирования определения НДС бортов котлована, расположенного между ограждением и призмой обрушения под углом φ , регистрировали сигналы акустической эмиссии (АЭ). Общий вид лотка с песком представлен на рис.4.

После сборки экспериментального лотка, проводили нулевой отсчет индикаторов с последующим снятием распорок, которые до этого удерживали ограждение в вертикальном положении. В этом случае устойчивость ограждения обеспечивалась за счет создания противодействия и существующих сил трения песка о боковые стенки лотка. Более того, оказалось, что описанная конструкция ограждения надежно удерживает ограждение бортов котлована не только после уборки распорок, но и допускала приложение дополнительного горизонтального усилия к ограждению в сторону котлована, т.е. имела “внутренний” запас устойчивости. Прове-



а)



б)

Рис. 4. Схема (а) и общий вид (б) установки для проведения испытаний устойчивости ограждения котлована с пригрузом

дение контрольного опыта показало, что ограждение без пригруза и распределительной площадки обрушается в котлован.

Для сравнения была исследована схема с шарнирным соединением площадки с верхней частью ограждения, не создающим изгибающего момента. При этом нижняя часть горизонтальной площадки для выравнивания скоростей перемещений частиц массива в разных слоях была снабжена решеткой в виде гребенки. Оказалось, что, как и в первом варианте, такая схема допускает приложение дополнительной горизонтальной нагрузки. Наибольшие перемещения ограждение получило в момент уборки распорок, потом чего приращения перемещений радикально уменьшились. График зависимости между прикладываемыми горизонтальными усилиями и соответствующими им перемещениями при величине пригруза, равной 0,8 от активного давления, представлен на рис. 5.

Анализ полученных результатов показал, что величина приложения дополнительной горизонтальной нагрузки к ограждению в сторону котлована в обоих вариантах сопостави-

ма с величиной активного давления грунта потенциальной призмы обрушения. На первом этапе приложения усилия к ограждению (примерно до величины 0,5 от активного давления) перемещения стенки в сторону котлована – незначительные, в пределах 1 мм. Далее скорость перемещений увеличивается, и только при величине примерно 0,9 от активного давления начинается прогрессирующая подвижка ограждения.

Таким образом, замкнутая система, включающая ограждение, горизонтальную площадку на поверхности борта, конструктивно связанную с ограждением и пригруз при отсутствии распорок приводит к увеличению несущей способности грунта в пределах призмы обрушения. Снижение величины пригруза до 0,6 от активного давления, приводит к тому, что дополнительное горизонтальное усилие, при котором обеспечивается устойчивость выработки, снижается примерно в 1,5 раза. В случае защемления стенки в дно котлована величина пригруза, достаточная для обеспечения устойчивости бортов котлована, составляет 0,4 активного давления потенциальной призмы обрушения.

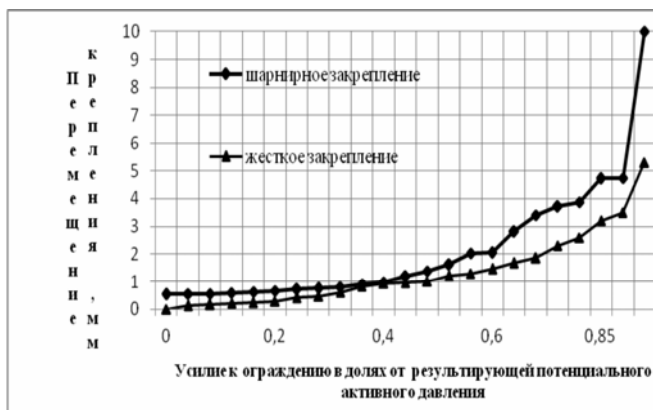


Рис. 5. Зависимости между горизонтальными усилиями к ограждению с пригрузом и соответствующими перемещениями в сторону котлована

Вывод

Выполненные исследования показали, что предлагаемый способ устройства ограждающих конструкций котлованов с пригрузом, не загромождающих пространство котлована, позволяет использовать резервы несущей способности вмещающего массива, слагающего борта котлована, и управлять его НДС в определенных границах при строительстве подземных сооружений открытым способом в городских условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маковский Л.В., Чеботарев С.В., Зега С.О.* Системы крепления котлованов при строительстве подземных сооружений: Учебное пособие / МАДИ (ТУ). – 2000.
2. *Корчак А.В., Мороз А.И.* К вопросу о минимизации снижения природных прочностных свойств вмещающего массива при устройстве ограждающих конструкций котлованов в условиях городской застройки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2010. – №8. – С. 7-14.
3. *Аникин А.А., Мороз А.И., Наймагон М.С., Жашков В.С.* Определение горизонтальных перемещений верха ограждения котлована. / «Геотехнические проблемы мегаполисов». Труды междунар. конф. по геотехнике (7–10 июня 2010 г.). Т.4. – М.-СПб: ПИ «Геореконструкция», НИИОСП, 2010. – С.1417 -1422.
4. *Патент РФ № 2178049.* Способ мониторинга трещин в строительных конструкциях / Репников Л.Н., Мороз А.И., Жашков В.С., Аникин А.А. – БИ, 2002. – №1.
5. *Патент РФ № 2327008.* Крепление бортов котлована / Картозия Б.А., Репников Л.Н., Сандуковский А.Э. и др. – БИ, 2008. – №17.
6. *Картозия Б.А., Мороз А.И.* Возникновение самонапряженного состояния горной породы при разгрузке. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2001. – №4.
7. *Мороз А.И.* Самонапряженное состояние горных пород. – М.: Изд-во МГГУ, 2004.
8. *СТО 36554501-019-2010.* Выявление самонапряженного состояния горной породы / А.И.Мороз, Л.Н. Репников, А.И. Аникин. М.: ОАО «НИЦ «Строительство», 2010. **ИДБ**

Коротко об авторах

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

