УДК 624.1

© И. В. Хритин, ст. научн. сотрудник
(АО «НИЦ «Строительство» НИИОСП
им. Н. М. Герсевича)
E-mail: ilyas-niiosp@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-2-154-162

© I. V. Khritin, senior research worker
(OJSC SRC "Stroitelstvo" NIIOSP
named after N. M. Gersevanov)
E-mail: ilyas-niiosp@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА УСИЛИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВАНОВ

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF SEASONAL TEMPERATURE CHANGES ON THE FORCES IN EXCAVATION SHORING CONSTRUCTIONS

Приведены результаты экспериментальных исследований воздействия сезонных изменений температур на напряженно-деформируемое состояние системы «массив грунта — ограждающая конструкция — распорная крепь», проведенных экспериментально-технологическим отделением НИИОСП им. Н. М. Герсевича на крупномасштабной физической модели котлована в большом грунтовом лотке. Описаны методика проведения исследований и применяемое оборудование. Определены зависимости изменения усилий в конструкциях ограждения котлована при изменении температуры распорок. Экспериментальные данные сопоставлены с результатами проведенных ранее численных исследований.

Ключевые слова: температурные усилия в распорной системе, сезонные изменения температуры, приращение усилий, геотехнический прогноз, податливость грунта за ограждением котлована, изгибающие моменты в ограждающей стенке.

The paper presents the results of experimental studies of the effects of seasonal temperature changes on the stress-strain state of the "soil – shoring – expansion-type support" system. The research was implemented by the experimental technology department specialists of NIIOSP named after N. M. Gersevanov on a large-scale physical model of the pit. The research method and the equipment used are described. The dependences between changes of the force in the pit shoring at changes of temperature in the support system are determined. Experimental data are compared with the results of the numerical studies carried out previously.

Keywords: thermal forces in the support system, seasonal temperature changes, increment of forces, geotechnical prediction, soil flexibility behind the pit shoring construction, bending moments in the pit shoring.

Температурные воздействия на строительные конструкции могут иметь самое разнообразное происхождение, но чаще всего рассматриваются климатические температурные воздействия.

Учитывая, что длительность работ в котлованах может составлять до года и более, при их проектировании появляется необходимость учитывать воздействие сезонного изменения температуры на напряженно-деформируемое состояние (НДС) ограждающих и распорных конструкций котлована. Смонтированные в холодные периоды года распорки в теплые периоды удлиняются и, как следствие, в них увеличиваются внутренние усилия, возникающие из-за сопротивления окружающего котлован массива

грунта. В системах, смонтированных в летний период, наоборот, в осенне-зимний период распорки укорачиваются, что приводит к дополнительным горизонтальным перемещениям ограждения котлована и осадкам прилегающей к котловану территории. В условиях средней полосы России сезонный перепад температуры распорок, не защищенных теплоизоляцией, может достигать 60 °С.

В научно-технической литературе [1–3] и нормативной литературе достаточно широко изучен и освещен вопрос учета температурных воздействий в строительный и эксплуатационный период при расчете зданий из железобетонных, металлических, каменных и армокаменных

конструкций. При этом вопросы температурных деформаций и напряжений в элементах ограждения котлована, связанных с грунтом основания, имеющим податливость, изучены еще недостаточно.

Современные исследования [4–7] показывают необходимость учета влияния сезонных изменений температуры на дополнительные усилия, возникающие в распорной системе котлована при изменении температуры последних.

Данные натурных экспериментов [8] и [9] также подтверждают увеличение усилий в распорной системе при повышении температуры распорок. В котловане глубиной 16 м с четырьмя ярусами распорок, выполненном для строительства подземной части здания Main Tower (г. Франкфурт, Германия), при повышении температуры на 20 °С зафиксировано увеличение усилий в распорках до 60 % (рис. 1).

Другие данные получены при строительстве станции Esplanade Station (г. Перт, Западная Австралия) в котловане глубиной 13 м, с тремя ярусами распорок из труб $\varnothing 406 \times 9,5$ мм и $\varnothing 1016 \times 16$ мм средней длиной 23,5 м. Грунтовые условия площадки представлены преимущественно переслаивающимися пластами песка и суглинка. Результаты эксперимента показали,

что при повышении температуры на 25 °С дополнительные усилия в распорке верхнего яруса увеличиваются на 30 % (рис. 2).

Ранее авторами статьи проведена серия численных исследований [10] закономерности изменения НДС конструкций ограждения котлована и окружающего массива грунта при изменении температуры в распорной системе. По результатам были определены зависимости приращений «температурных» усилий в конструкциях ограждения котлована глубиной 6 м с одноярусным креплением, в песчаных грунтах различной крупности и плотности. Установлено, что при длине распорок 40 м и увеличении температур на 30 °С усилия в последних увеличиваются до 110 %, изгибающие моменты в ограждении возрастают до 46 %. Основным фактором, влияющим на температурные усилия в распорках, является податливость грунта за стенками котлована, и чем лучше грунтовые условия, тем влияние данного фактора значительней.

В современной практике проектирования котлованов расчеты распорок на температурные воздействия, как правило, производятся по схеме с неподвижно защемленными опорами (без учета податливости грунтового массива). При этом численными исследованиями установлено,

Рис. 1. Данные натурных испытаний влияния суточного изменения температуры на усилия в распорках ограждения котлована (строительство Main Tower в г. Франкфурт, Германия) [8]

Рис. 2. Результаты измерения усилий в распорках ограждения котлована при изменении температуры за трехдневный период (строительство Esplanade Station в г. Перт, Западная Австралия) [9]

что в случае учета податливости грунта за стенками котлована дополнительные усилия в распорках минимум в 2,5 раза меньше. В результате проектирование осуществляется с перерасходом материала.

Однако проектирование котлованов без учета температурных воздействий на работу и поведение конструкций ограждения котлованов может послужить причиной аварийных ситуаций, связанных как непосредственно с ограждениями котлованов, так и с окружающей застройкой. Одним из примеров является предаварийная ситуация, произошедшая в 1995 г. при строительстве торгового центра «Охотный ряд» на Манежной площади в Москве [11].

В продолжение численных исследований для выявления характера действительных условий работы ограждающих и распорных конструкций ограждения котлована и сравнения их результатов с расчетными данными были проведены экспериментальные опыты на крупномасштабной физической модели конструкции ограждения котлована.

Исследования проводились летом 2016 года в большом грунтовом лотке Экспериментального корпуса НИИОСП им. Н. М. Герсеевича размерами в плане 14×4 м, высотой 6,0 м, в песчаном грунте нарушенной структуры.

Принцип физического моделирования позволил вести исследование на модели, сохраняющей физическую природу изучаемого явления. При этом соответствующие величины, характеризующие явление, для прототипа и модели отличаются лишь количественно.

Прототипом физической модели послужил котлован глубиной 6,0 м с ограждением из труб $\varnothing 426 \times 8$ мм длиной 9,0 м с шагом 1,0 м и одним ярусом распорок из труб $\varnothing 426 \times 8$ мм с шагом 4,5 м на глубине 1,5 м. Модель котлована принята в виде пропорционально уменьшенного в три раза котлована-прототипа. Выбор масштаба модели, жесткости ограждающей стенки и распорок применительно к условиям моделирования в грунтовом лотке основывался на соблюдении простого подобия относительных расчетных деформаций ограждающих стенок котлована-прототипа и модели (рис. 3).

В результате модельный котлован принят глубиной 2,0 м, шириной 3 м. Ограждающая стенка — из металлических труб $\varnothing 89 \times 4$ мм, длиной 3,0 м с шагом 0,2 м. Распорная система, включающая обвязочные пояса из сваренных в коробку швеллеров № 12 и распорок из труб $\varnothing 89 \times 4$ мм с шагом 1,0 м, устанавливалась на глубине 0,5 м (рис. 4, 5).

Для исключения возможного технологического разуплотнения грунта на контакте с ограж-

Рис. 3. Эпюры горизонтальных перемещений ограждающих стенок: а — котлован-прототип; б — опытный котлован

Рис. 4. Конструкция опытного котлована

дающей стенкой трубы и металлическая заборка погружались задавливанием статической нагрузкой.

Экспериментальными исследованиями было предусмотрено моделирование удлинения распорок, возникающего при изменении температуры. Для изменения температурного состоя-

ния распорок на модели до 60°C использовался греющий кабель, который навивался на каждую распорку с последующей теплоизоляцией материалом базальт-картон. Температура нагрева распорок регулировалась системой, состоящей из реле и датчика температуры, установленного на распорке.

Рис. 5. Общий вид опытного котлована

В связи с тем что при длине распорок модельного котлована 2,2 м удлинения распорок при повышении их температуры относительно малы, там же были проведены испытания с применением домкратов, моделирующих удлинение распорок большей длины (15 м) в том же диапазоне изменения температуры.

В процессе эксперимента нагрев распорок осуществлен синхронно и ступенчато по 10 °С. При работе с домкратами принят тот же принцип, и реализация изменения длины распорок выполнена ступенчато: с шагом по 1,8 мм, что соответствовало температурному удлинению распорки при перепаде температуры 10 °С.

В соответствии с задачами исследований на каждой ступени контролировались: усилия в распорках и ограждении, горизонтальные перемещения ограждающих стенок и вертикальные перемещения поверхности грунта за ограждением.

Для определения усилий в конструкциях котлована была сформирована автоматизированная система мониторинга напряжений на базе оборудования фирмы СИТИС (Россия), позволявшая снимать показания как по требованию (в режиме реального времени), так и с заданным промежутком времени. Система включала накладные струнные тензометры, даталоггеры «Игла», ноутбук, программное обеспечение и модуль беспроводной сети. На каждую распорку устанавливается по три тензометра, равномерно

распределенные по окружности в одном сечении на 4, 8 и 12 ч, и четыре тензометра (по одному тензометру с противоположных сторон котлована в створе с каждой распоркой) на трубы ограждающей стенки в уровне максимального расчетного момента. Для учета погрешности показаний вследствие воздействия температуры на струну тензометра для распорок и ограждающих стенок были предусмотрены контрольные тензометры без нагрузки.

Контроль вертикальных перемещений поверхности окружающего опытный котлован массива грунта осуществлялся при помощи осадочных марок в виде металлических пластин размером 50×50×4 мм и индикаторов часового типа, установленных с шагом 0,4 м в перпендикулярном ограждению котлована направлении.

Перемещения ограждающих стенок измерялись электронными (ПСК-МГ4) и аналоговыми прогибомерами (6ПАО).

Общий вид установленного в опытном котловане измерительного оборудования приведен на рис. 6.

По результатам проведенных экспериментов были определены зависимости изменения усилий в ограждающих конструкциях опытного котлована от изменения температуры распорок.

Максимальные дополнительные усилия в конструкциях опытного котлована определены равными:

Рис. 6. Общий вид установленного измерительного оборудования

- при фактическом повышении температуры распорок греющим кабелем: $P = 6,8$ кН/м, $M = 0,2$ кНм/м, что в $\sim 2,2$ раза и в $\sim 1,2$ раза соответственно увеличивает начальные усилия от давления грунта;

- при испытаниях с помощью домкратов: $P = 24$ кН/м, $M = 2,0$ кНм/м, что в $\sim 5,2$ раза и в $\sim 2,6$ раза соответственно увеличивает начальные усилия от давления грунта.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что зависимости изменения усилий в ограждающих конструкциях опытного котлована от изменения температуры распорок близки к линейным (рис. 7, 8). При этом данные экспериментальных исследований в опытном котловане достаточно хорошо согласуются с результатами численных расчетов в PLAXIS.

Заключение

В результате экспериментальных исследований получены данные, характеризующие

напряженно-деформируемое состояние ограждающих конструкций котлованов, подверженных температурным воздействиям. Опытные данные подтвердили результаты проведенных ранее численных исследований, показавших необходимость учета сезонных изменений температуры при проектировании ограждающих конструкций котлована, а также учета податливости грунта за ограждением.

Многие из современных программных комплексов имеют инструментарий, позволяющий моделировать температурные воздействия при расчете геотехнических сооружений, в том числе ограждений котлованов, и должны быть использованы при проектировании котлована.

Применение на практике учета податливости грунта при определении температурных воздействий на распорную систему ограждений позволит сократить материалоемкость и объемы строительно-монтажных работ при устройстве котлованов и избежать возможных аварийных ситуаций.

Библиографический список

1. Пантелеев Н. Н., Безземмер Д. А. Исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрических зданий при температурных воздействиях // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 11. С. 105–112.
2. Буадзе И. Э., Гагнидзе И. Ш., Ксениди В. С. Об особенностях расчета крупнопанельных зданий на температурные воздействия // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 3. С. 39–42.
3. Шапиро Г. И., Коровкин В. С. К вопросу о напряженно-деформированном состоянии жилых и общественных зданий при температурных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 12. С. 5–8.
4. Петрухин В. П., Шулятьев О. А., Мозгачева О. А. Особенности строительства Турецкого торгового центра // Основания и фундаменты. 2003. № 2. С. 6–8.
5. Петрухин В. П., Шулятьев О. А., Мозгачева О. А. Опыт проектирования и мониторинга подземной части Турецкого торгового центра // Основания и фундаменты. 2004. № 5. С. 2–8.
6. Петрухин В. П., Поспехов В. С., Шулятьев О. А. Опыт проектирования и мониторинга глубокого котлована // НИИОСП им. Н. М. Герсевича. Сб. науч. трудов. Вып. 99. М.: Издательский дом «Экономика, строительство, транспорт», 2008. С. 139–148.

Рис. 7. Сопоставление экспериментальных и расчетных усилий от изменения температуры (при испытании греющим кабелем): а — усилия M в ограждении опытного котлована; б — усилия P в распорках опытного котлована

7. Шулятьев О. А., Поспехов В. С., Шулятьев С. О. Из практики проектирования ограждающей конструкции и фундаментной плиты административного комплекса с четырехуровневой подземной автостоянкой // Жилищное строительство. 2012. № 9. С. 50–53.

8. Moormann Ch. In-situ monitoring and analysis of braced excavations with irregular shape / Kastner, Emeriault, Dias, Guilloux (eds) // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Lyon, 2002.

9. Zaremba N. L. Experiences in strut load monitoring in excavations for the new metrorail city project. School of Civil and Resource Engineering // The University of Western Australia, 2007.

10. Хритин И. В. Сезонные изменения усилий в ограждении котлованов // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 85–89.

11. Колыбин И. В. Уроки аварийных ситуаций при строительстве котлованов в городских условиях // Развитие городов и геотехническое строительство. 2008. № 12. С. 90–124.

References

1. Panteleev N. N., Bezgemmer D. A. *Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tsilindricheskikh zdaniy pri temperaturnykh vozdeystviyakh* [Research

Рис. 8. Сопоставление экспериментальных и расчетных усилий от изменения температуры (при испытании домкратами): а — усилий M в ограждении опытного котлована; б — усилий P в распорках опытного котлована

of the intense deformed condition of cylindrically shaped buildings at temperature influences]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. – News of higher educational institutions. Construction, 2011, no. 11, pp. 105–112.

2. Buadze I. Eh., Gagnidze I. Sh., Ksenidi V. S. *Ob osobennostyakh rascheta krupnopanel'nykh zdaniy na temperaturnye vozdeystviya* [About features of calculation of large-panel buildings on temperature influences]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* – Construction mechanics and calculation of constructions, 2014, no. 3, pp. 39–42.

3. Shapiro G. I., Korovkin V. S. *Kvoprosu onapryazhenno-deformirovannom sostoyanii zhilykh i obshchestvennykh zdaniy pri temperaturnykh vozdeystviyakh* [To the issue of the intense deformed condition of residential and public buildings at temperature influences]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* – Industrial and civil engineering, 2008, no. 12, pp. 5–8.

4. Petrukhin V. P., Shulyat'ev O. A., Mozgacheva O. A. *Osobennosti stroitel'stva Turetskogo trgovogo tsentra* [Features of construction of the Turkish shopping center]. *Osnovaniya i fundamente* – Bases and foundations, 2003, no. 2, pp. 6–8.

5. Petrukhin V. P., Shulyat'ev O. A., Mozgacheva O. A. *Opyt proektirovaniya i monitoringa podzemnoy chasti Turetskogo torgovogo tsentra* [Experience of designing and monitoring of the underground part of the Turkish shopping center]. *Osnovaniya i fundamenty – Bases and foundations*, 2004, no. 5, pp. 2–8.
6. Petrukhin V. P., Pospekhov V. S., Shulyat'ev O. A. *Opyt proektirovaniya i monitoringa glubokogo kotlovana* [Experience of designing and monitoring of the deep pit]. *NIIOSP im. N. M. Gersevanova. Sb. nauch. trudov. Vyp. 99* [NIIOSP named after N. M. Gersevanov. Coll. of sci. works. Iss. 99]. Moscow, Ehkonomika, stroitel'stvo, transport Publ., 2008, pp. 139–148.
7. Shulyat'ev O. A., Pospekhov V. S., Shulyat'ev S. O. *Iz praktiki proektirovaniya ograzhdayushchey konstruktssii i fundamentnoy plity administrativnogo kompleksa s chetyrehurovnevoy podzemnoy avtostoyankoy* [From the practice of designing the enclosing structure and the base plate for the administrative complex with four-level underground parking]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2012, no. 9, pp. 50–53.
8. Moormann Ch. In-situ monitoring and analysis of braced excavations with irregular shape. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Lyon, 2002.
9. Zarembo N. L. Experiences in strut load monitoring in excavations for the new metro-rail city project. *School of Civil and Resource Engineering*. University of Western Australia Publ., 2007.
10. Khritin I. V. *Sezonnye izmeneniya usiliy v ograzhdenii kotlovanov* [Seasonal changes of efforts in a protection of pits]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2016, no. 10, pp. 85–89.
11. Kolybin I. V. *Uroki avariynykh situatsiy pri stroitel'stve kotlovanov v gorodskikh usloviyakh* [Lectures on emergency situations at construction of pits in city conditions]. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Development of the cities and geotechnical construction*, 2008, no. 12, pp. 90–124.