УДК 624.159

© В. В. Конюшков, канд. техн. наук, доцент
© Н. Ю. Уразаева, магистрант
© В. М. Кириллов, д-р техн. наук, профессор
© Л. Н. Кондратьева, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: v.konyushkov@mail.ru, 31january@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-1-68-74

© V. V. Konyushkov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© N. Yu. Urazaeva, undergraduate
© V. M. Kirillov, Dr. Sci. Tech., Professor
© L. N. Kondrat'eva, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: v.konyushkov@mail.ru, 31january@mail.ru

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ «СТЕНЫ В ГРУНТЕ» В КАЧЕСТВЕ ОГРАЖДАЮЩЕЙ И НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

TO THE ISSUE OF STUDYING THE DIAPHRAGM WALL AS AN ENCLOSING AND LOAD-BEARING CONSTRUCTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Проводится анализ преимуществ и недостатков траншейной «стены в грунте». Рассматривается численное моделирование работы «стены в грунте» в качестве ограждения котлованов и несущей конструкции зданий в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. Представлено сравнение результатов расчетов, полученных в ПК ЛИРА и ПК Plaxis.

Ключевые слова: стена в грунте, численное моделирование, ограждение котлованов.

The paper presents an analysis of advantages and disadvantages of the trench «wall in the ground» (diaphragm wall) used in construction industry. Numerical modeling of the trench «wall in the ground» performance is considered as an enclosure of excavation pits and a load-bearing construction of buildings in the engineering and geological conditions of St. Petersburg. A comparison analysis of the results obtained in LIRA PC and Plaxis PC is presented.

Keywords: diaphragm wall, numerical modeling, comparative analysis.

Введение

Развитие подземного пространства в условиях мегаполиса связано с устройством открытых котлованов в районах с плотной застройкой. В центральной части городов это часто историческая застройка, находящаяся под охраной государства. Задача разработки котлована в условиях Санкт-Петербурга усложняется наличием специфических грунтовых условий со следующими характерными особенностями:

- неравномерные напластования грунтов;
- переслаивание водонасыщенных грунтов со слабопроницаемыми;
- наличие сильнодеформируемых текучих и текучепластичных глинистых грунтов мощностью 20–30 м и более;
- включение гравия, гальки, валунов в моренных отложениях.

Существуют различные методы устройства ограждения котлованов, успешно применяемые

в мировой практике, такие как металлический шпунт различных профилей; ограждение из буронабивных и буросекущих свай; грунтоцементный массив (технология jet grouting); траншейная «стена в грунте». У каждой технологии существуют свои преимущества и недостатки.

Особенности конструкции «стены в грунте»

Технология траншейной «стены в грунте» заключается в устройстве стен подземных сооружений в узких и глубоких траншеях под защитой глинистого раствора. Траншеи разрабатываются захватками. Длина захватки обычно составляет 2,5–3,4 м, ширина может быть 0,6–1,2 м. Каждая захватка отделяется ограничителями, армируется отдельным каркасом, а затем бетонируется по технологии вертикально перемещающейся трубы, что позволяет вытеснить глинистый раствор вверх за счет его меньшей, чем у бетона, плотности.

Основные преимущества ограждения типа «стена в грунте»:

- высокая изгибная жесткость по сравнению с другими типами ограждений;
- отсутствие вибрационных, ударных и других динамических воздействий, которые недопустимы при производстве работ в тесной городской застройке;
- высокие жесткостные параметры и возможность воспринимать большие нагрузки;
- возможность использования в качестве несущей конструкции в качестве внешних и внутренних стен здания.

Проблемы при проектировании и строительстве траншейной «стены в грунте»:

- подбор правильного состава бентонитового раствора и обеспечение устойчивости стенок траншей от обрушения при разработке;
- контроль сплошности и прочности (рис. 1);
- время и стоимость производства работ;
- повышенные требования к температурным, усадочным, силовым и осадочным деформациям в случае, если «стена в грунте» применяется как несущая конструкция;
- обеспечение надежной гидроизоляции подземного пространства;
- ограничение горизонтальных перемещений при использовании «стены в грунте» в качестве несущей конструкции;
- учет распределения жесткостей и перераспределения усилий при расчете напряженно-деформированного состояния конструкции и грунтового массива.

Применение «стены в грунте» в качестве несущей конструкции

В качестве примера использования «стены в грунте» как ограждающей и несущей конструкции представлен объект в центральной части Санкт-Петербурга. На рис. 2 представлена ситуационная схема расположения объекта нового строительства вплотную к существующим зданиям и характерный разрез.

Проектируемое здание имеет семь надземных и три подземных этажа.

Для возведения здания использовалась технология semi-top-down (полуоткрытый способ), которая подразумевает использование участков перекрытий в качестве распорных конструкций. Выемка грунта выполнялась через свободные

Рис. 1. Дефекты в конструкции «стены в грунте». Нарушение сплошности бетона

технологические отверстия, расположенные в центре котлована. На рис. 3 представлены основные этапы производства работ.

Использование «стены в грунте» в качестве основания под надземные несущие конструкции позволяет уменьшить количество свай в фундаменте, ускорить процесс производства работ по возведению подземных конструкций, так как «стена в грунте» одновременно служит и несущей стеной подземных этажей. На рис. 4 представлена фотография со строительной площадки в процессе бетонирования распорных дисков перекрытий подземных этажей.

Моделирование расчетных случаев конструкции «стена в грунте»

«Стена в грунте», используемая в качестве фундамента здания, находится в сложном напряженно-деформируемом состоянии. Помимо горизонтального давления со стороны грунта, на нее будет передаваться значительное продольное усилие от веса вышележащих конструкций. В этом случае стена в грунте будет работать на сжатие с изгибом и ее необходимо рассчитывать как внецентренно сжатый элемент.

Согласно пособию к СП 63.13330.2012 необходимо выполнять расчет железобетонного элемента:

- на прочность на внецентренное сжатие;
- воздействие поперечной силы;
- температурные воздействия;
- трещиностойкость.

Рис. 2. Ситуационная схема и характерный разрез

Обычно численные расчеты стены в грунте выполняют в современных геотехнических программных комплексах, таких как Plaxis 2D, Plaxis 3D, которые позволяют моделировать сложные инженерно-геологические условия, но имеют ограниченные возможности в моделировании конструкций. Для полного анализа работы стены в грунте можно использовать расчетные комплексы, такие как SCAD, ЛИРА САПР, позволяющие детально моделировать работу железобетонной конструкции.

В данном исследовании представлена серия тестовых расчетов конструкции «стены в грунте»

в расчетных комплексах Plaxis 2D и ЛИРА-САПР. В качестве расчетных рассматриваются два случая:

- стена как ограждающая конструкция котлована;
- стена как ограждающая и несущая конструкция.

Для простоты оценки работы конструкции «стены в грунте» характеристики грунтового массива были приняты одинаковыми по всей глубине расчетного разреза. Физико-механические характеристики грунта сведены в табл. 1.

Расчет произведен в линейной постановке, для моделирования грунтов использовались

Рис. 3. Этапы производства работ

Таблица 1

**Физико-механические характеристики
грунта**

Удельный вес γ , кН/м ³	Угол внутреннего трения, φ	Удельное сцепление c , кПа	Модуль деформации E , МПа
22,6	27	11	17

Рис. 4. Бетонирование распорных дисков подземных этажей

модели, заложенные в программных комплексах: модель Мора–Кулона — в Plaxis и коэффициенты упругого основания в ЛИРЕ. Грунтовый массив, окружающий стенку, был смоделирован упрощенно в виде активного и пассивного давления. Активное давление грунта было задано как внешняя распределенная нагрузка, определяемая по формуле

$$\sigma_a = (q + \gamma z)K_a - 2c\sqrt{K_a}, \quad (1)$$

где K_a — коэффициент активного давления, значение которого определяется по формуле

$$K_a = \tan^2(45 + \varphi/2). \quad (2)$$

Пассивное давление грунта было смоделировано в виде упругих связей, которые представляют собой коэффициенты постели, для боковой поверхности сваи и определяются по формуле

$$C_z = \frac{K \cdot z}{\gamma_c}, \quad (3)$$

где K — коэффициент пропорциональности, определяемый в зависимости от вида грунта, окружающего сваю; γ_c — коэффициент условий работы (для отдельно стоящей сваи $\gamma_c = 3$).

В качестве примера была рассмотрена захватка стены в грунте с размерами поперечного сечения 1000×600 мм. В расчетном сечении задан один уровень распорных конструкций на глубине 1 м от поверхности земли. На рис. 5 представлен вид расчетной схемы в ПК ЛИРА.

Моделирование стены в качестве ограждающей конструкции

При моделировании стены как ограждающей конструкции в ПК ЛИРА использовались расчетные модели из линейных плоских и объемных 8-узловых конечных элементов. В ПК Plaxis моделирование «стены в грунте» выполнялось с помощью плитного элемента и с помощью кластера. В качестве выходных параметров в объемной модели получают картину распределения напряжений в сечении. Для перехода от напряжений к усилиям необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$M = \sigma W, \quad (4)$$

где σ — нормальное напряжение в сечении; W — момент сопротивления сечения.

Результаты расчета в программных комплексах представлены на рис. 6.

Моделирование стены в качестве несущей конструкции

При рассмотрении стены как ограждающей и несущей конструкции в расчете использовались объемные элементы — кластеры в ПК Plaxis и 8-узловые конечные элементы в ПК ЛИРА с заданными характеристиками материалов.

Рис. 5. Аналитическое представление расчетной схемы в ПК ЛИРА. Слева: ограждающая конструкция, справа: несущая конструкция

Рис. 6. Результаты расчета в ПК: а — распределение напряжений в объемных элементах в ПК ЛИРА; б — эпюра изгибающих моментов в ПК ЛИРА ($M_{\max} = 13,7 \text{ т} \cdot \text{м}$); в — распределение напряжений в объемных элементах в ПК Plaxis; з — эпюра изгибающих моментов в ПК Plaxis ($M_{\max} = 16,5 \text{ т} \cdot \text{м}$)

Продольная сила от надземных конструкций прикладывалась с эксцентриситетом. Результаты расчета представлены на рис. 7 и в табл. 2.

Заключение

Проведенные тестовые расчеты в ПК ЛИРА и ПК Plaxis показали, что при одном характере работы значения изгибающих моментов, получаемых в программных комплексах, имеют хорошую сходимость.

При моделировании работы стены в грунте как несущей конструкции значения изгибающих моментов в сечении на 30 % выше, чем в случае работы стены только в качестве ограждения.

По результатам проведенных исследований работы стены в грунте в качестве ограждающей и несущей конструкции было выявлено множество факторов, оказывающих влияние на усилия в конструкции. К таким факторам относятся:

- геометрические параметры котлована и стены в грунте;

Рис. 7. Результаты расчета: а — распределение напряжений в объемных элементах в ПК ЛИРА; б — эпюра изгибающих моментов в ПК ЛИРА ($M_{\max} = 21,3 \text{ т} \cdot \text{м}$); в — распределение напряжений в ПК Plaxis ($M_{\max} = 24 \text{ т} \cdot \text{м}$)

Таблица 2

Сводная таблица результатов расчета. Значение изгибающих моментов в ограждении

Параметр	Характер работы	ПК ЛИРА		ПК Plaxis	
		Стержневая схема	Объемная схема	Моделирование плитой	Моделирование кластером
Максимальный изгибающий момент «стене в грунте», т · м	Стена как ограждающая конструкция	13,7	11	16,5	15,2
	Стена как ограждающая и несущая конструкция	21,3	23	—	24

- глубина котлована;
- наличие окружающей застройки;
- температурные деформации;
- трещинообразование.

В дальнейших исследованиях планируется проведение более детальных сравнительных расчетов стены в грунте с учетом влияния вышеперечисленных факторов, а также анализ влияния численной расчетной схемы и конкретных особенностей программ (модели грунтов, типы конечных элементов и т. д.) на получаемые результаты.

Библиографический список

1. Ильичев В. А., Мангушев Р. А. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения: 2-е изд., доп. и перераб. / под общ. ред. В. А. Ильичева и Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2016. С. 709–717.
2. Шулятьев О. А., Мозгачева О. А., Поспехов В. С. Освоение подземного пространства городов. М.: АСВ, 2017. С. 42–44.
3. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С., Конюшков В. В., Осокин А. И., Сапин Д. А. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах. М.: АСВ, 2013. С. 54–68.
4. Мангушев Р. А., Сахаров И. И., Конюшков В. В., Ланько С. В. Сравнительный анализ численного моделирования системы «здание–фундамент–основание» в программных комплексах SCAD и PLAXIS // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 3 (24). С. 96–101.
5. Сапин Д. А. Осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте» // Жилищное строительство. 2015. № 4. С. 8–13.
6. Шулятьев О. А., Минаков Д. К. Технологические осадки при устройстве стены в грунте траншейного

типа // Вестник Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. 2017. № 3 (8). С. 41–50.

7. Мангушев Р. А., Веселов А. А., Конюшков В. В., Сапин Д. А. Численное моделирование технологической осадки соседних зданий при устройстве траншейной «стены в грунте» // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 5 (34). С. 87–98.

8. Мангушев Р. А., Веселов А. А., Сапин Д. А. Влияние формы сечения конструкции «стена в грунте» на дополнительную осадку соседних зданий // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 6 (35). С. 71–77.

References

1. Il'ichev V. A., Mangushev R. A. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya* [Geo-engineering reference book. Bases, foundations, and subsurface structures.]. 2-nd issue, revised and added. Moscow, DIA Publ., 2016, pp. 709–717.
2. Shulyat'ev O. A., Mozgacheva O. A., Pospikhov V. S. *Osvoenie podzemnogo prostranstva gorodov* [Development of underground space of the cities]. Moscow, ASV Publ., 2017, pp. 42–44.
3. Mangushev R. A., et al. *Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzhenie v otkrytykh kotlovanakh*. Ucheb. posobie [Design and arrangement of underground structures in open excavation pit. Teaching manual]. Moscow, St. Petersburg, ASV Publ., 2013, pp. 54–68.
4. Mangushev R. A., Sakharov I. I., Konyushkov V. V., Lan'ko S. V. *Sravnitel'nyy analiz chislennogo modelirovaniya sistemy «zдание–fundament–osnovanie» v programmnykh kompleksakh SCAD i PLAXIS* [Comparative analysis of computational modeling of the system “building–foundation–base” in the soft ware packages SCAD and PLAXIS]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* – Bulletin of Civil Engineers, 2010, no. 3 (24), pp. 96–101.
5. Sapin D. A. *Osadki fundamentov zdaniy sosedney zastroyki pri ustroystve transheynoy «steny v grunte»*

[Settlement of the buildings bases of the neighboring building development at construction of the trench "wall in soil"]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2015, no. 4, pp. 8–13.

6. Shulyat'ev O. A., Minakov D. K. *Tekhnologicheskie osadki pri ustroystve steny v grunte transheynogo tipa* [Technological settlement at construction of the wall in soil of the trench type]. *Vestnik Permskogo nats. issled. politekhn. un-ta. Stroitel'stvo i arkhitektura Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University, Construction and Architecture*, 2017, no. 3 (8), pp. 41–50.

7. Mangushev R. A., Veselov A. A., Konyushkov V. V., Sapin D. A. *Chislennoe modelirovanie tekhnologicheskoy*

osadki sosednikh zdaniy pri ustroystve transheynoy «steny v grunte» [Numerical simulation of adjoining development's technology settlement in process of trench slurry wall construction]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2012, no. 5 (34), pp. 87–98.

8. Mangushev R. A., Veselov A. A., Sapin D. A. *Vliyanie formy secheniya konstruksii «stena v grunte» na dopolnitel'nuyu osadku sosednikh zdaniy* [The influence of the «slurry wall» construction section form on the extra settlement of neighboring buildings]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2012, no. 6 (35), pp. 71–77.