УДК 539.3

© М. Б. Заводчикова, канд. геол.-мин. наук, доцент
© Д. В. Андрейко, магистрант
© Р. А. Усманов, д-р техн. наук, профессор
© Л. Н. Кондратьева, д-р техн. наук, профессор
© В. М. Кириллов, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: 1206611@gmail.com, andreikodiana93@gmail.
com, rustamusmanov54@yandex.ru,
kondratjevaln@yandex.ru, geotechnica@spbgasu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-93-99

© M. B. Zavodchikova, PhD in Sci. Geo.-Min., Associate Professor
© D. V. Andreyko, undergraduate
© R. A. Usmanov, Dr. Sci. Tech., Professor
© L. N. Kondrat'eva, Dr. Sci. Tech., Professor
© V. M. Kirillov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: 1206611@gmail.com, andreikodiana93@gmail.
com, rustamusmanov54@yandex.ru,
kondratjevaln@yandex.ru, geotechnica@spbgasu.ru

ОЦЕНКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ АНАЛИТИЧЕСКИМ И ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДАМИ

ESTIMATION OF ADDITIONAL FOUNDATION BOTTOM DEFORMATION USING ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS

Рассмотрено влияние нового строительства на существующую застройку. Выполнен расчет дополнительной осадки фундаментов аналитическим и численным методами, проведено сравнение результатов расчета.

Ключевые слова: модель грунта, осадка, напряжения.

The article deals with the impact of new construction development on the existing buildings. The authors submit the results of additional settlement calculation performed by analytical and numerical method. The calculation results are compared.

Keywords: soil model, settlement, stresses.

Введение

В настоящее время в городах строительство зачастую ведется в условиях уже сложившейся застройки. Наряду с новым строительством ведется реконструкция существующих зданий, при которой могут пристраиваться новые корпуса, надстраиваться этажи и т. д. Нередко эти процессы оказывают существенное влияние на фундаменты окружающей застройки, так как вызывают изменение напряженно-деформированного состояния грунтов основания. В связи с этим целью настоящей статьи является оценка влияния реконструкции на существующую застройку и сравнение результатов расчетов, выполненных аналитическим и численным методами.

1. Инженерно-геологические условия площадки и анализ конструктивных решений объекта

Геолого-литологическое строение площадки изысканий на вскрытую выработками глубину до 25,0 м представлено толщей техногенных отложений (tQ_{IV}), четвертичных аллювиально-делювиальных отложений (adQ_{II-III}) и средне-пермскими элювиальными отложениями (eP_2).

ИГЭ-1а. Насыпной грунт планировочной отсыпки, представленный смесью суглинка и песка. С поверхности перекрыт бетоном толщиной 0,2 м.

Согласно п. 9.2.1 СП 11-105-97, ч. 3, насыпные техногенные грунты завершили стадию самоуплотнения.

ИГЭ-26. Суглинок тугопластичный, коричневый, с частой мелкой дресвой. При полном водонасыщении суглинок приобретает мягкопластичную консистенцию с предельным показателем текучести 0,612 д. е. (долей единицы). ИГЭ-26 находится в зоне промерзания грунтов и является сильнопучинистым.

ИГЭ-7а. Глина среднепермская, элювиальная, твердая и полутвердая, коричневая. При полном водонасыщении глина приобретет полутвердую консистенцию с предельным показателем текучести 0,117 д. е. Залегают глубже зоны сезонного промерзания грунтов.

Согласно гидрогеологическим данным водоносный горизонт зафиксирован на глубине 15,8 м от поверхности в слое ИГЭ-7а.

Инженерно-геологический разрез представлен на рис. 1, физико-механические характеристики грунтов — в табл. 1.

В рамках реконструкции завода для производственных нужд планируется организовать дополнительные площади. Существующие фундаменты — столбчатые, глубина заложения 2,55 м от уровня земли. Давление по подошве фундаментов $p_1 = 80$ кПа, с учетом собственного веса фундамента и веса грунта на уступах фундамента

$p_{\text{сум}} = 135$ кПа. Фундаменты нового корпуса свайные. Высота плитного ростверка 1 м с размерами в плане 8,2×8,2 м. Сваи в количестве 25 штук буронабивные, диаметром 600 мм, длиной 16 м. Нижний конец свай находится в слое ИГЭ-7а. Нагрузка на ростверк составляет $p_2 = 171,5$ кПа.

В качестве примера расчет произведем для фундамента Ф-1, расположенного в осях 28'/6. На рис. 2 представлена схема расположения фундаментов.

2. Аналитическое определение дополнительной осадки

Поскольку при реконструкции устраиваются новые фундаменты, в основании существующих фундаментов возникают дополнительные напряжения.

Для определения дополнительной осадки фундамента Ф-1 аналитически используем метод угловых точек. В соответствии с этим методом вертикальные напряжения $\sigma_{zp,a}$ на глубине z от подошвы фундамента по вертикали, проходящей через произвольную точку A , вычисляют алгебраическим суммированием напряжений $\sigma_{zp,cj}$ в угловых точках четырех фиктивных фундаментов по формуле

$$\sigma_{zp,a} = \sum_{j=1}^4 \sigma_{zp,cj}. \quad (1)$$

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов

Наименование характеристик грунта	Буквенное обозначение	Размерность	ИГЭ-26			ИГЭ-7а		
			Нормативные значения	Расчетные значения		Нормативные значения	Расчетные значения	
				1-я группа ($\alpha = 0,95$)	2-я группа ($\alpha = 0,85$)		1-я группа ($\alpha = 0,95$)	2-я группа ($\alpha = 0,85$)
Природная влажность	W	д. е.	0,255			0,235		
Коэффициент водонасыщения	S_r	д. е.	0,865			0,868		
Полная возможная влажность	W_{sat}	д. е.	0,295			0,271		
Число пластичности	I_p	д. е.	0,144			0,197		
Показатель текучести	I_L	д. е.	0,334			<0		
Плотность	ρ	кН/м ³	18,54	18,15	18,34	19,03	18,64	18,84
Коэффициент пористости	e	—	0,802			0,739		
Модуль деформации	E	МПа	14,83			22,42		
Угол внутреннего трения	ϕ	°		18,47	21,24		17,74	20,41
Удельное сцепление	c	кПа		15,81	23,71		27,34	41,02

Рис. 1. Инженерно-геологический разрез

С учетом влияния соседних фундаментов на прилегающие площади вертикальные напряжения $\sigma_{zp,nf}$ на глубине z от подошвы фундамента вычисляются по формуле

$$\sigma_{zp,nf} = \sigma_{zp} + \sum_{i=1}^k \sigma_{zp,ai}, \quad (2)$$

где σ_{zp} — среднее значение вертикального нормального напряжения от внешней нагрузки

в i -ом слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, кПа; $\sigma_{zp,ai}$ — вертикальные напряжения от соседнего фундамента; k — число влияющих фундаментов.

Для учета влияния каждого из фундаментов Ф-2...Ф-7 составим схемы фиктивных фундаментов. Дополнительные напряжения от каждого из фиктивных фундаментов входят в формулу (1) со своим знаком.

Необходимо учесть, что дополнительная нагрузка от фундаментов Ф-2...Ф-5 передается в уровне подошвы ростверка Ф-1, в отличие от свайных фундаментов Ф-6 и Ф-7. Нагрузка от ростверка свайного фундамента передается на сваи, которые передают нагрузку на грунт. Таким образом, на глубине $z = 14,7$ м относительно подошвы Ф-1 в уровне острия свай возникают дополнительные напряжения от свайных фундаментов.

Осадку s основания фундамента Ф-1 вычислим методом послойного суммирования с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого полупространства. Учитывая, что глубина заложения Ф-1 $d_f = 2,55$ м меньше 5 м, а также отсутствует информация о размерах котлована для существующих фундаментов, формула для расчета осадки примет вид:

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp,nf} h_i}{E_i}, \quad (3)$$

где h_i — толщина i -го слоя грунта, см, принимаемая не более 0,4 ширины фундамента; E_i — модуль деформации i -го слоя грунта по ветви первичного нагружения, кПа.

Нижнюю границу сжимаемой толщи основания принимаем на глубине $z = H_c$, где выполняется условие

Рис. 2. Схема расположения фундаментов

Рис. 3. Расчетная схема к расчету осадки Ф-1

Таблица 2

Осадка рассматриваемого фундамента Ф-1 с учетом существующих и новых фундаментов

Грунт	№ точки	z, м	σ_{zg} , кПа	$\eta = l/b$	$Z = 2z/b$	α_1	$0,5\alpha_{доп.1}$	$\alpha_{сум.1}$	$\sigma_{зр сум 1}$, кПа	$\sigma_{зр доп 1}$, кПа	$\sigma_{зр сум 2}$, кПа	h_p , м	E_p , кПа	$k \cdot \sigma_{zg} = 0,5\sigma_{zg}$	$\Sigma \sigma_{зр} \cdot h_i$
Суглинок	0	0,000	44,56	1,13	0,00	1,0000	0,0000	1,000	135	—	135,00	0	14 830	22,28	265,01
	1	0,300	55,564		0,25	0,9774	0,0005	0,978	132,01		132,01	0,6		27,78	
	2	0,900	66,568		0,75	0,8341	0,0067	0,841	113,52		113,52	0,6		33,28	
	3	1,500	77,572		1,25	0,6114	0,0241	0,636	85,79		85,79	0,6		38,79	
	4	2,100	88,576		1,75	0,4330	0,0331	0,466	62,92		62,92	0,6		44,29	
	5	2,700	99,58		2,25	0,3099	0,0414	0,351	47,43		47,43	0,6		49,79	
	6	3,300	110,58		2,75	0,2275	0,0463	0,274	36,97		36,97	0,6		55,29	
	7	3,900	121,59		3,25	0,1723	0,0492	0,221	29,90		29,90	0,6		60,79	
	...	...	...		...	...	...	...	...		...	...		...	
	11	6,325	166,52		5,27	0,0731	0,0467	0,120	16,17		16,17	0,65		83,26	
Глина	12	6,950	177,83		5,79	0,0612	0,0446	0,106	14,28		14,28	0,6	22 420	88,91	
	13	7,550	189,13		6,29	0,0524	0,0430	0,095	12,87		12,87	0,6		94,56	
	...	...	...		...	...	...	...	...		...	...		...	
	23	13,550	302,17		11,29	0,0168	0,0280	0,045	6,05		6,05	0,6		151,08	
	24	14,275	318,18		11,90	0,0150	0,0278	0,043	5,77		5,77	0,85		159,09	
	25	14,700	324,81		12,25	0,0138	0,0272	0,041	5,53		5,53	—		162,40	
	26	15,000	329,49		12,50	0,013	0,0271	0,040	5,41		5,41	0,6		164,74	
	27	15,600	340,79		13,00	0,0113	0,0265	0,038	5,10		5,10	0,6		170,40	
	28	16,200	352,1		13,50	0,0097	0,0258	0,036	4,80		4,80	1,08		176,05	
	29	16,800	363,4		14,00	0,008	0,0252	0,033	4,48		4,48	3,03		181,70	
	30	17,400	374,7		14,50	0,0063	0,0245	0,031	4,16		4,16	5,01		187,35	
	31	18,000	386,01		15,00	0,0047	0,0239	0,029	3,86		3,86	7,64		193,00	
	32	18,600	397,31		15,50	0,0030	0,0232	0,026	3,55		3,55	9,52		198,66	
	33	19,200	408,62		16,00	0,0014	0,0226	0,024	3,24		3,24	11,22		204,31	
	34	19,800	419,92		16,50	-0,0003	0,0219	0,022	2,92		2,92	13,01		209,96	
H_z , м		3,00												$S_{сум}$, см	1,43

Рис. 4. Значения напряжений в точках 22–34

$$\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}, \quad (4)$$

где σ_{zg} — вертикальное эффективное напряжение от собственного веса грунта.

Результаты расчета сведены в табл. 2 и представлены на рис. 3 и 4.

По результатам расчета осадка Ф-1 составила $s = 1,43$ см, мощность сжимаемого слоя по расчету $H_c = 3$ м.

Точка 0 соответствует подошве Ф-1, точка 25 — подошве условных свайных фундаментов Ф-6 и Ф-7, точки 26...34 — центры тяжести элементарных слоев грунта. На глубине 14,7 м (точка 25) от подошвы Ф-1 возникают дополнительные напряжения $\sigma_{zp \text{ доп}}$, в результате суммарное напряжение от внешней нагрузки $\sigma_{zp \text{ сум. 2}}$ перестает уменьшаться с глубиной и начинает расти.

Но $\sigma_{zp \text{ сум. 2}}$ растет медленнее, чем $0,5\sigma_{zg}$, и имеет значения существенно меньшие, что позволяет сделать вывод о том, что согласно методу угловых точек дополнительной осадки Ф-1 не прогнозируется.

3. Численное определение дополнительной осадки

Для определения дополнительной осадки рассматриваемого фундамента было выполнено моделирование в ПК Plaxis 2D в модели упрочняющегося грунта, использующей модуль разгрузки при снижении напряжений в элементе. Кроме того, в этой модели принята гиперболическая зависимость напряжений от деформаций.

Для расчета осадки рассмотрим разрез 1–1 (разрез по оси б). Размеры грунтового массива, принятого в модели, назначались из соображений, что мощность грунта под острием свай должна соответствовать сжимаемой толще при расчете осадки свайного фундамента вручную. Расчетная схема приведена на рис. 5.

Характер работы грунта на контакте с бетонными элементами учитывался специальными интерфейсными элементами ($R_{inter} = 0,67$), понижающими характеристики грунта, в области устройства свай.

Нагрузка на столбчатые фундаменты $p_1 = 80$ кПа, на свайные $p_2 = 171,5$ кПа. Собственный вес фундаментов и грунта на уступах фундамента учтен программой. Последовательность строительства учитывалась поэтапно.

По результатам расчета осадка рассматриваемого фундамента составила $s = 3,38$ см.

Рис. 5. Расчетная схема осадки свайного фундамента

Рис. 6. Вертикальные перемещения

Дополнительная осадка составила $s_{ad} = 0,7 \text{ см} < s_{ad,н} = 3 \text{ см}$, что удовлетворяет нормам СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Картина деформаций представлена на рис. 6.

4. Сравнение результатов расчета

4.1. Для сравнения результатов расчета по двум методам сравним значения полных напряжений по центру рассматриваемого фундамента Ф-1 на глубине 17,2 м от подошвы Ф-1, что соответствует мощности сжимаемой толщи свайного фундамента.

Согласно аналитическим расчетам $p = \sigma_{зр\text{ сум } 2} + \sigma_{zg} = 380 \text{ кПа}$. По результатам численных расчетов $p = 337 \text{ кПа}$. Относительная погрешность составляет 11,3 %, что говорит об удовлетворительной сходимости результатов. Однако численным методом не удалось оценить дополнительную осадку Ф-1, в то время как аналитически она составила $s_{ad} = 0,7 \text{ см}$. На рис. 7 представлена эпюра полных напряжений по центру Ф-1.

4.2. О дополнительной осадке Ф-1 косвенно можно судить по деформациям свайного фундамента. Осадка свайного фундамента аналитически была посчитана методом послойного суммирования как для условного свайного фундамента и составила $s_{св,аналит} = 1,7 \text{ см}$ с мощностью сжимаемой толщи $H_c = 2,5 \text{ м}$, в то время как в Plaxis $s_{св,числ} = 0,9 \text{ см}$. Данное расхождение в результатах объясняется тем, что численный метод учитывает этапность строительства, а значит и разгрузку дна

котлована при его откопке. Это вызывает поднятие дна котлована, что занижает итоговую осадку свайного фундамента. Также вклад в расхождение результатов вносит использование в качестве модуля деформации модуля разгрузки. Таким образом, делаем вывод: осадка свайного фундамента имеет место, что приведет к дополнительной осадке Ф-1, так как фундаменты находятся на расстоянии 2 м друг от друга. Деформации свайного фундамента представлены на рис. 8.

Выводы

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Как показывает пример в настоящей статье, аналитические методы расчетов не всегда позволяют правильно оценить влияние реконструкции на фундаменты существующей застройки. Это связано с тем, что дополнительные напряжения могут возникать ниже сжимаемой толщи фундаментов, а так как их значения малы, то это не позволяет рассчитать дополнительную осадку аналитическим методом (природные напряжения значительно превышают дополнительные напряжения).

2. Численное моделирование позволяет рассчитать дополнительную осадку зданий за пределами условия, при котором природные напряжения значительно превышают дополнительные напряжения.

3. Для правильной оценки напряженно-деформированного состояния грунтов и опреде-

Рис. 7. Полные напряжения по центру Ф-1

Рис. 8. Осадка свайных фундаментов

ления дополнительных деформаций рекомендуется выполнять расчеты различными методами и сравнивать результаты с данными натурных наблюдений.

Библиографический список

1. Мангушев Р. А., Карлов В. Д., Сахаров И. И. Механика грунтов: учебник. М.: АСВ, 2009. 264 с.
2. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С., Конюшков В. В., Осокин А. И., Сапин Д. А. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах: учеб. пособие. М., СПб.: АСВ, 2013. 256 с.
3. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В. А. Ильичева и Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2014. 728 с.

References

1. Mangushev R. A., Karlov V. D., Sakharov I. I. *Mekhanika gruntov. Uchebnik* [Mechanics of soil. Textbook]. Moscow, ASV Publ., 2009, 264 p.
2. Mangushev R. A., et al. *Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh. Ucheb. posobie* [Design and layout of underground structures in open excavation pits. Teaching manual]. Moscow, St. Petersburg, ASV Publ., 2013, 256 p.
3. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenti i podzemnye sooruzheniya* [Reference book for geotechnical engineers. Bases, foundations, and underground structures]. Ed. by Il'ichev V. A., Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2014, 728 p.