DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.12

УДК 624.159.4

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ЗАГРУЖЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ДЛЯ ИХ УСИЛЕНИЯ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ

А.И. Полищук¹, А.А. Филиппович², И.В. Семенов¹

¹Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 24 февраля 2016
Принята: 01 апреля 2016
Опубликована: 30 июня 2016

Ключевые слова:

отдельно стоящие фундаменты, инъекционные сваи, комбинированный фундамент, численное моделирование, усиление фундаментов, перераспределение нагрузки, реконструкция зданий

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена совершенствованию метода оценки загрузки отдельных фундаментов реконструируемых зданий для их усиления в глинистых грунтах при помощи инъекционных свай. Рассматриваемый метод учитывает перераспределение внешней нагрузки от здания между элементами сформированного (комбинированного) фундамента: его плитной частью и инъекционными сваями. Приведены результаты расчета комбинированных фундаментов с различными геометрическими параметрами – длиной инъекционных свай ($L_{св} = 3, 6, 9, 12$ м) и шириной подошвы отдельного фундамента ($b_{ф} = 1; 1,5; 2$ м). Грунтовые условия представлены в виде однородного слоя мягкопластичного суглинка с соответствующими прочностными и деформационными характеристиками. Моделирование работы усиливаемого инъекционными сваями отдельного фундамента выполнялось при помощи метода конечных элементов на базе программного комплекса Midas GTS. В ходе анализа результатов установлено, что между давлением по подошве комбинированного фундамента $p_{с}$ после его усиления и давлением по подошве комбинированного фундамента $p_{ф}$ до его усиления существует функциональная зависимость. Аналитический вид зависимости был получен при помощи аппроксимации результатов расчетов полиномом второй степени. Для определения доли нагрузок, передаваемых на элементы комбинированного фундамента, был использован метод, предложенный А.А. Филиппович и др. В соответствии с указанным методом (при известном значении давления $p_{с}$ по подошве фундамента после его усиления) определяется доля нагрузки $D_{ф}$ (%), передаваемая на грунт основания подошвой отдельного фундамента, и доля нагрузки $D_{св}$ (%), передаваемая на грунт основания инъекционными сваями. Приведен пример оценки загрузки отдельного фундамента для его усиления в глинистом грунте при помощи инъекционных свай с заданными геометрическими параметрами. Предлагаемый в работе метод определения доли нагрузок, передаваемых элементами комбинированного фундамента на глинистый грунт основания, является предварительным и будет в дальнейшем уточняться.

© ПНИПУ

© Полищук Анатолий Иванович – доктор технических наук, профессор, e-mail: ofpai@mail.ru.
Филиппович Анна Александровна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: annafilich@mail.ru.
Семенов Иван Владимирович – аспирант, e-mail: amigos_siv@mail.ru.

Anatolii I. Polishchuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: ofpai@mail.ru.
Anna A. Filippovich – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: annafilich@mail.ru.
Ivan V. Semenov – Postgraduate Student, e-mail: amigos_siv@mail.ru.

DEVELOPMENT OF THE EVALUATION METHOD OF LOADING SPREAD FOOTING FOR STRENGTHENING THEM BY INJECTION PILES IN CLAY SOILS

A.I. Polishchuk¹, A.A. Filippovich², I.V. Semenov¹

¹Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 24 February 2016
Accepted: 01 April 2016
Published: 30 June 2016

Keywords:

spread footing, injection piles, combined foundation, numerical modeling, foundation strengthening, load transfer, building reconstruction

ABSTRACT

The present work is devoted to improving the evaluation method of loading spread footing reconstructed buildings at its strengthening in clay soils by means of injection piles. Considered method allows for the transfer of the external load of the building between the elements formed (combined) foundation: its part of plate and injection piles. The results of calculation of combined foundation with different geometrical parameters (the length of injection piles and width of spread footing) are presented. Ground conditions are presented as uniform high-plastic loam layer with appropriate strength and strain characteristics. Modeling work of strengthening spread footing by injection piles was carried out using the finite element method with means Midas GTS software. The analysis results revealed that there is a functional relationship between the pressure p_{yc} at the underside of the combined foundation after strengthening and pressure p_{ϕ} at the underside of the combined foundation before strengthening. The analytical form of dependence was obtained with means approximating the calculations results by a polynomial of the second degree. To determine the share loads transfer to the combined foundation elements, a method has been used, the proposed AA Filippovich etc. According to this method (with a known value of pressure p_{yc} at the underside of the foundation after his strengthening) share load D_{ϕ} (%) transmitted to the ground base through spread footing, and share load $D_{св}$ (%) transmitted to the ground base through injection piles is determined. An example of evaluation loading of spread footing at its strengthening in clay soils by means of injection piles with given geometric parameters is presented. Contained method of calculation share loads transmitted on clay soil base by elements combined foundation is preliminary and requires further clarification.

© PNRPU

В условиях реконструкции и восстановления зданий довольно часто приходится решать вопросы усиления оснований и фундаментов, обеспечивающих надежность их эксплуатации в различных грунтовых условиях [1, 2]. В последние годы получил распространение способ усиления фундаментов путем передачи части нагрузки от здания на инъекционные сваи. Способ запатентован в России, прошел апробацию и внедрен на ряде объектов в Томске, Новосибирске, Кемерово и других городах. Однако вопросы расчета усиления отдельных фундаментов с использованием инъекционных свай разработаны пока недостаточно.

При усилении отдельного фундамента инъекционными сваями происходит перераспределение внешней нагрузки от здания между элементами сформированного (комбинированного) фундамента – его плитной частью и инъекционными сваями. При этом важным этапом расчета усиления является определение доли нагрузок, передаваемых на элементы комбинированного фундамента (подопшву плитной части и инъекционные сваи) (рис. 1) [3–5].

Цель настоящей работы заключалась в совершенствовании метода расчета усиления отдельных фундаментов инъекционными сваями в глинистых грунтах. При этом были выполнены расчеты комбинированных фундаментов с различными геометрическими параметрами.

В рассматриваемой работе использовалось компьютерное моделирование, которое является одним из эффективных методов оценки поведения сложных систем. Компьютерные

Рис. 1. Схема распределения внешней нагрузки от здания между элементами фундамента:

a – до его усиления; *б* – после его усиления инъекционными сваями; *1* – колонна, *2* – отдельный фундамент, *3* – инъекционная свая; N_1 – нагрузка на фундамент до реконструкции здания, N_2 – нагрузка на фундамент после реконструкции здания, N_ϕ – нагрузка, передаваемая на плитную часть отдельного фундамента, $N_{св}$ – нагрузка, передаваемая на инъекционные сваи, p – давление по подошве отдельного фундамента до его усиления, $p_{ус}$ – давление по подошве отдельного фундамента после его усиления

Fig. 1. Scheme of spreading of the building load between the foundation elements:

a – before the strengthening; *b* – after the strengthening by using of injection piles; *1* – column, *2* – spread footing, *3* – injection pile; N_1 – load on the foundation of the building before reconstruction, N_2 – load on the foundation of the building after reconstruction, N_ϕ – load on the slab of spread footing, $N_{св}$ – load on the injection piles, p – pressure on the underside of a spread footing before strengthening, $p_{ус}$ – pressure on the underside of a spread footing after strengthening

модели проще и удобнее исследовать, благодаря проведению вычислительных экспериментов в тех случаях, когда реальные эксперименты затруднены или невозможны [6, 7]. Расчет комбинированного фундамента в глинистых грунтах производился в программном комплексе Midas GTS, который прошел верификацию в России (2013 г.) [8]. В настоящей работе рассматривался отдельный железобетонный фундамент квадратной формы в плане при его центральном нагружении. Для моделирования работы материала отдельного фундамента и инъекционных свай выбрана линейно-упругая модель Elastic, которая характеризовалась следующими параметрами: удельный вес бетона $\gamma = 24 \text{ кН/м}^3$; коэффициент Пуассона бетона $\nu = 0,18$; модуль упругости бетона $E = 27,5 \text{ МПа}$.

В качестве основания был принят грунт, представляющий собой мягкопластичный суглинок. Физико-механические характеристики грунта следующие: удельный вес грунта $\gamma = 18...20 \text{ кН/м}^3$; коэффициент пористости $e = 0,85...1,05$; модуль упругости $E = 9...11 \text{ МПа}$; удельное сцепление $c = 10...12 \text{ кПа}$; угол внутреннего трения $\phi = 10...12^\circ$ [3].

Геометрические параметры комбинированного фундамента были приняты следующие:

- длина инъекционных свай $L_{св} = 3, 6, 9, 12 \text{ м}$ при диаметре $d_{св} = 250 \text{ мм}$;
- ширина подошвы фундамента $b_\phi = 1; 1,5; 2 \text{ м}$.

При моделировании работы отдельных фундаментов, усиливаемых инъекционными сваями в глинистых грунтах, были получены значения давления по их подошве до и после

усиления (p_{yc} и p_{ϕ}) в зависимости от геометрических параметров комбинированного фундамента. Результаты расчета давления по подошве отдельного фундамента p_{yc} после его усиления инъекционными сваями при ширине подошвы фундамента $b_{\phi} = 1$ м и $b_{\phi} = 1,5$ м представлены в табл. 1. По полученным данным (см. табл. 1) составлены графики зависимости давлений по подошве фундамента p_{ϕ} до усиления и давлений по подошве фундамента p_{yc} после усиления существующего фундамента ($b_{\phi} = 1,5$ м) при различной длине инъекционных свай L_{cb} (рис. 2). Результаты расчета давления по подошве отдельного фундамента после его усиления инъекционными сваями при ширине подошвы фундамента $b_{\phi} = 1$ и $b_{\phi} = 2$ м в настоящей работе не приводятся.

Рис. 2. График зависимости давлений по подошве фундамента до усиления от давлений по подошве фундамента после усиления существующего фундамента ($b_{\phi} = 1,5$ м) при длине инъекционных свай: 1 – $L_{cb} = 3$ м; 2 – $L_{cb} = 6$ м; 3 – $L_{cb} = 9$ м; 4 – $L_{cb} = 12$ м

Fig. 2. The graph of pressure on the underside of a spread footing before foundation strengthening ($b_{\phi} = 1,5$ м) at the length of injection piles: 1 – $L_{cb} = 3$ м; 2 – $L_{cb} = 6$ м; 3 – $L_{cb} = 9$ м; 4 – $L_{cb} = 12$ м

В ходе анализа установлено, что между указанными выше величинами p_{yc} и p_{ϕ} существует функциональная зависимость (см. табл. 1, рис. 2). Аналитический вид функции $p_{yc} = f(p_{\phi})$ был получен при помощи аппроксимации результатов расчетов, проведенных в ПК Midas GTS.

Полиномом второй степени [9, 10]

$$p_{yc} = a_1 p_{\phi}^2 + a_2 p_{\phi} + a_3, \quad (1)$$

где p_{ϕ} – давление по подошве фундамента до его усиления инъекционными сваями; a_1 , a_2 , a_3 – параметры аппроксимации (значения параметров аппроксимации при ширине подошвы отдельного фундамента $b_{\phi} = 1,5$ м приведены в табл. 2).

Таблица 1

Результаты расчета давления по подошве отдельного фундамента после его усиления инъекционными сваями при ширине подошвы фундамента $b_{\phi} = 1$ м и $b_{\phi} = 1,5$ м

Table 1

The calculation results of pressure on the underside of a spread footing after his strengthening by injection piles at the width of the foundation underside $b_{\phi} = 1$ m and $b_{\phi} = 1,5$ m

Нагрузка N на фундамент здания после его реконструкции	Давление по подошве фундамента p_{yc} (кПа) после его усиления инъекционными сваями длиной (м)			
	3	6	9	12
Данные при ширине подошвы фундамента $b_{\phi} = 1$ м				
100	62,3	33,2	13,4	10,3
150	73,2	40,2	25,6	13,4
200	94,8	58,4	40,8	25,3
250	129,2	78,3	64,3	39,5
Данные при ширине подошвы фундамента $b_{\phi} = 1,5$ м				
150	84,2	63,6	39,6	25,6
225	104,8	73,8	44,3	32,5
300	141,8	93,8	57,2	42,2
375	175,2	126,2	71,9	52,3

Для определения доли нагрузок, передаваемых на элементы комбинированного фундамента, был использован метод, предложенный А.А. Филиппович и др. [4, 5]. При известном значении давления p_{yc} по подошве фундамента после его усиления доля нагрузки D_{ϕ} (%), передаваемая на грунт основания подошвой отдельного фундамента, составит:

$$D_{\phi} = \frac{(p_{yc} \cdot 100 \%) }{p_{\phi}}, \quad (2)$$

где p_{yc} , p_{ϕ} – то же, что в формуле (1).

Доля нагрузки $D_{св}$ (%), передаваемая на грунт основания инъекционными сваями, составит:

$$D_{св} = 100 \% - D_{\phi}, \quad (3)$$

где D_{ϕ} – доля нагрузки, передаваемая на грунт основания подошвой отдельного фундамента.

Таким образом, усовершенствован метод оценки загрузки отдельных фундаментов при их усилении инъекционными сваями в глинистых грунтах. Зная геометрические параметры комбинированного фундамента (длину инъекционных свай $L_{св}$, м, ширину подошвы фундамента b_{ϕ} , м) и используя параметры аппроксимации, можно определить доли нагрузок, передаваемых элементами комбинированного фундамента на глинистый грунт основания. Предлагаемый метод оценки загрузки отдельного фундамента учитывает размеры его подошвы ($b_{\phi} = 1$ м; $1,5$ м; 2 м), длину инъекционных свай, используемых для усиления ($L_{св} = 3, 6, 9, 12$ м), диаметр инъекционных свай $d_{св} = 0,25$ м, а также глинистый грунт (суглинок) мягкопластичной консистенции с модулем деформации грунта $E = 9...11$ МПа, углом внутреннего трения грунта $\phi = 10...12$ град и удельным сцеплением грунта $c = 10...12$ кПа.

Приведенные в настоящей работе данные определения доли нагрузок, передаваемых элементами комбинированного фундамента на глинистый грунт основания, являются предварительными и будут в дальнейшем уточняться.

Таблица 2

Значения параметров аппроксимации при ширине подошвы
отдельного фундамента $b_{\phi} = 1,5$ м

Table 2

The values of the approximation parameters at a width a of the foundation
underside $b_{\phi} = 1,5$ m

Параметры аппроксимации	Результаты аппроксимации при длине инъекционных свай $L_{\text{св}}$, м			
	3	6	9	12
a_1	0,00128	0,00222	0,001	0,00032
a_2	0,172	–0,3614	–0,1304	0,0676
a_3	53,2	77,67	42,32	15,52
$\bar{A}$, %	0,033	0,003	0,031	0,004

Примечание: $L_{\text{св}}$ – длина инъекционных свай, м; b_{ϕ} – ширина подошвы фундамента, м; a_1 , a_2 , a_3 – параметры аппроксимации, кН; $\bar{A}$ – средняя ошибка аппроксимации, %.

Пример. Требуется оценить загрузку отдельного фундамента мелкого заложения под колонну здания после его реконструкции.

Исходные данные. Ширина подошвы фундамента $b_{\phi} = 1,5$ м, глубина заложения $d = 1$ м; вертикальная суммарная нагрузка, действующая в уровне подошвы фундамента после реконструкции здания, $N = 340$ кН; расчетное сопротивление естественного грунта основания $R = 110$ кПа.

Решение. Давление p_{ϕ} по подошве существующего отдельного фундамента до его усиления

$$p_{\phi} = \frac{N}{A} = \frac{340}{1,5 \cdot 1,5} = 151,1 > R = 110 \text{ кПа}.$$

Давление по подошве p_{ϕ} превышает расчетное сопротивление грунта основания R ($p_{\phi} > R$), следовательно, требуется усиление фундамента. Принимаем решение по его усилению инъекционными сваями. Предполагается расположить четыре инъекционные сваи длиной $L_{\text{св}} = 3$ м, диаметром $d_{\text{св}} = 0,25$ м, устраиваемые в углах отдельного фундамента через его плитную часть. При заданных параметрах свай в соответствии с данными аппроксимации (см. табл. 2) давление по подошве фундамента после его усиления $p_{\text{ус}}$ определяем по формуле (1):

$$p_{\text{ус}} = a_1 p_{\phi}^2 + a_2 p_{\phi} + a_3 = 0,00128 \cdot 151,1^2 + 0,172 \cdot 151,1 + 53,2 = 108,4 \text{ кПа}.$$

Условие $p_{\text{ус}} < R$ выполняется, следовательно, количество инъекционных свай и их геометрические параметры подобраны верно.

При известном значении давления $p_{\text{ус}}$ по подошве фундамента после его усиления долю нагрузки D_{ϕ} (%), передаваемой на грунт основания подошвой отдельного фундамента, определяем по формуле (2):

$$D_{\phi} = \frac{(p_{yc} \cdot 100 \%) }{p_{\phi}} = \frac{(108,4 \cdot 100 \%) }{151,1} = 71,7 \% \approx 72 \%,$$

что соответствует нагрузке $N_{\phi} = 340 \cdot 0,72 = 244,8$ кН.

Доля нагрузки $D_{св}$ (%), передаваемая на грунт основания инъекционными сваями, определяем по формуле (3):

$$D_{св} = 100 \% - D_{\phi} = 100 - 71,7 = 28,3 \% \approx 28 \%.$$

что соответствует нагрузке на четыре сваи $4N_{св} = 340 \cdot 0,28 = 95,2$ кН; нагрузке на одну сваю $N_{св} = 95,2/4 = 23,8$ кН.

Таким образом, установлено, что давление p_{yc} по подошве фундамента после его усиления $p_{yc} = N_{\phi}/A = 244,8/2,25 = 108,8$ кПа. Нагрузка, передаваемая на одну инъекционную сваю, $N_{св} = 23,8$ кН.

Библиографический список

1. Полищук А.И., Лобанов А.А., Тарасов А.А. Усиление оснований и фундаментов зданий и сооружений (справочные материалы) // Справочник геотехника: основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – С. 627–666.
2. Полищук А.И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий. – 3-е изд., доп. – Нортхэмптон; Томск: STT, 2007. – 476 с.
3. Семенов И.В. Применение ПК Midas GTS для моделирования работы отдельно стоящего фундамента реконструируемого здания при его усилении инъекционными сваями [Электронный ресурс] // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии: науч.-образ. политемат. журнал. – 2015. – № 4. – URL: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=4&s=284> (дата обращения: 21.03.2016).
4. Полищук А.И., Самарин Д.Г., Филиппович А.А. Исследование совместной работы ленточного фундамента и инъекционных свай, используемых для его усиления в глинистом грунте // Вестник ТГАСУ. – 2014. – № 3.
5. Филиппович А.А. Взаимодействие ленточных фундаментов реконструируемых зданий с глинистым грунтом основания при их усилении инъекционными сваями: автореф. ... канд. техн. наук. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2014. – 23 с.
6. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
7. Строкова Л.А. Применение метода конечных элементов в механике грунтов: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. – 143 с.
8. Midas GTS 2012 Analysis Manual. Part III – Constitutive Model / MIDAS Information Technology Co., Ltd. – 2012. – 100 p.
9. Землянский А.А. Обследование и испытание зданий и сооружений. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 240 с.
10. Демидович Б.П., Марон И.А. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения: учеб. пособие. – 4-е изд. – СПб: Лань, 2008. – 400 с.

References

1. Polishchuk A.I., Lobanov A.A., Tarasov A.A. Usilenie osnovanii i fundamentov zdanii i sooruzhenii [Strengthening of the foundations of buildings and structures]. *Spravochnik geotekhnika: osnovaniia, fundamenty i podzemnye sooruzheniia*. Ed. V.A. Il'icheva i R.A. Mangusheva. Moscow: Assotsiatsiia stroitel'nykh vuzov, 2014, pp. 627-666.
2. Polishchuk A.I. Osnovy proektirovaniia i ustroistva fundamentov rekonstruiemykh zdanii [Basics of Design and Arrangement of Foundations of Buildings under Reconstruction]. Nortkhempton; Tomsk: STT, 2007. 476 p.
3. Semenov I.V. Primenenie PK Midas GTS dlia modelirovaniia raboty otdel'no stoiashchego fundamenta rekonstruiuemogo zdaniia pri ego usilenii in"eksionnymi svaiami [Application Midas GTS for modeling the work of spread footing reconstructed building at its strengthening by injection piles]. *Stroitel'stvo i arkhitektura. Opyt i sovremennye tekhnologii*, 2015, no. 4, available at: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=4&s=284>.
4. Polishchuk A.I., Samarin D.G., Filippovich A.A. Issledovanie sovместnoi raboty lentochного fundamenta i in"eksionnykh svai, ispol'zuemykh dlia ego usileniia v glinistom grunte [A Study of collaboration of strip foundation and injection piles in clay soils]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2014, no. 3.
5. Filippovich A.A. Vzaimodeistvie lentochnykh fundamentov rekonstruiemykh zdanii s glinistym gruntom osnovaniia pri ikh usilenii in"eksionnymi svaiami [Interaction strip foundations of reconstructed buildings with clay soil base at its strengthening by injection piles]. Abstract of Ph.D. Thesis, Volgograd, 2014. 23 p.
6. Fadeev A.B. Metod konechnykh elementov v geomekhanike [The finite element method in geomechanics]. Moscow: Nedra, 1987. 221 p.
7. Strokova L.A. Primenenie metoda konechnykh elementov v mekhanike gruntov: uchebnoe posobie [Application of finite element method in soil mechanics]. *Tomskii politekhnicheskii universitet*, 2010. 143 p.
8. Midas GTS 2012 Analysis Manual. Part III – Constitutive Model. MIDAS Information Technology Co., Ltd, 2012. 100 p.
9. Zemlianskii A.A. Obsledovanie i ispytanie zdanii i sooruzhenii [Inspection and testing of buildings and structures]. Moscow, 2002. 240 p.
10. Demidovich B.P, Maron I.A. Chislennye metody analiza. Priblizhenie funktsii, differentsial'nye i integral'nye uravneniia: ucheb. posobie [Numerical methods of analysis. Approximation of functions, differential and integral equations]. Saint-Petersburg: Lan', 2008. 400 p.