

УДК 624.159.5

А.И. Полищук¹, Д.Г. Самарин², С.П.Осипов², А.А. Филиппович²¹Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Томск, Россия

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ФУНДАМЕНТА С ГЛИНИСТЫМ ГРУНТОМ ОСНОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ

Приведены результаты моделирования поведения комбинированного фундамента, который образован из ленточного фундамента, усиленного инъекционными сваями. Моделирование выполнялось на базе программного комплекса PLAXIS 3D Foundation. Установлены зависимости приращения осадок комбинированного фундамента от его геометрических параметров, интенсивности нагрузок и физико-механических характеристик грунтов основания. Разработаны предложения, позволяющие прогнозировать конечные осадки комбинированного фундамента реконструируемого здания.

Ключевые слова: реконструкция, усиление ленточного фундамента, примыкающие инъекционные сваи, комбинированный фундамент, осадка фундамента

A.I. Polishchuk¹, D.G. Samarin², S.P. Osipov², A.A. Filippovich²¹Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation²Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Tomsk, Russian Federation

THE INTERACTION COMBINED FOUNDATION WITH CLAY SOIL OF RECONSTRUCTION OF BUILDING

The numerical modeling results of behavior under load of a combined foundation (a shallow foundation and strengthening injection piles) have been presented. The modeling has been performed with the usage of PLAXIS 3D Foundation. The mutual influence between settlement increments of combined foundation (shallow foundation and adjacent injection piles) and its geometrical parameters, loads intensity, physical and mechanical characteristics of basement soils has been discovered. The suggestions which allow to predict of combine a foundation of reconstructed building have been developed.

Keywords: reconstruction, strengthening shallow foundation, adjacent injection piles, combined foundation, settlement of foundation.

Постоянный рост объемов реконструкции зданий и сооружений требует совершенствования способов усиления существующих фундаментов. При этом одним из эффективных является способ усиления фундаментов путем передачи части нагрузки от реконструируемого здания на *примыкающие инъекционные сваи** [1–5, 8]. Образованный таким образом фундамент в настоящей статье называется *комбинированным*. Практика реконструкции и восстановления зданий показывает, что до настоящего времени вопросы оценки совместной работы элементов комбинированного фундамента (ленточного и примыкающих инъекционных свай) изучены недостаточно. Ниже рассматривается подход к оценке взаимодействия комбинированного фундамента с глинистым грунтом основания, определению его конечных осадок в условиях реконструкции зданий.

Поставленная задача решалась моделированием в программном комплексе PLAXIS 3D Foundation [6] поведения комбинированного фундамента в грунтовом массиве с последующей математической обработкой полученных результатов. Для этого была создана расчетная модель (система) «ленточный фундамент – инъекционные сваи – грунт основания», применительно к которой были разработаны конечно-элементные расчетные схемы (рис. 1).

Для моделирования грунтового массива (грунтового основания) использовалась упруго-пластическая модель Мора–Кулона, которая требовала введения пяти основных параметров: модуля деформации грунтов E , коэффициента Пуассона ν , удельного сцепления c , угла внутреннего трения φ и угла дилатансии ψ . Для моделирования материала ленточного фундамента и инъекционных свай также задавались параметры: коэффициент Пуассона $-\hat{\nu}$, удельный вес $-\hat{\gamma}$, модуль упругости \hat{E} ; модуль сдвига \hat{G} .

Расчет производился в три стадии: 1) определение деформаций грунта от его собственного веса и их обнуление; 2) определение деформаций грунта основания от собственного веса заданных строитель-

* Под примыкающими инъекционными понимаются сваи, устраиваемые в непосредственной близости от боковых поверхностей существующего фундамента; они формируются в предварительно подготовленных скважинах, путем инъекции под давлением подвижной бетонной смеси с последующей их опрессовкой (А.И. Полищук [и др.] [2, 3, 7].)

ных конструкций; 3) приложение нагрузки и выбор точек для определения деформаций грунта в основании ленточного фундамента и инъекционных свай (рис. 1).

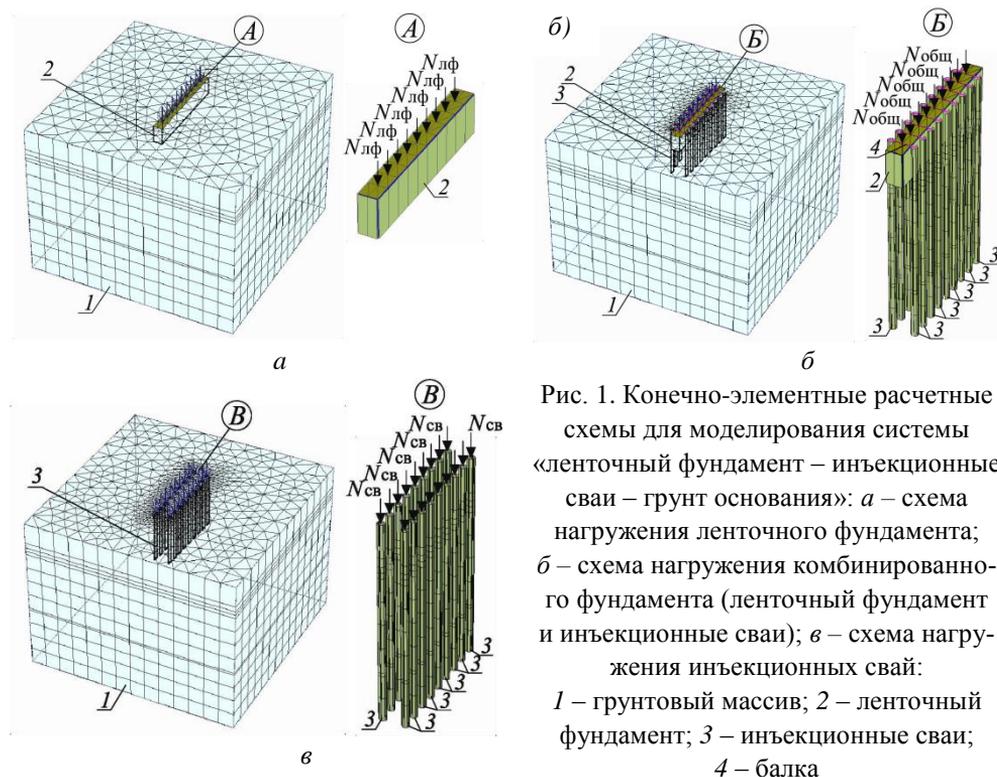


Рис. 1. Конечно-элементные расчетные схемы для моделирования системы «ленточный фундамент – инъекционные сваи – грунт основания»: а – схема нагружения ленточного фундамента; б – схема нагружения комбинированного фундамента (ленточный фундамент и инъекционные сваи); в – схема нагружения инъекционных свай:
 1 – грунтовый массив; 2 – ленточный фундамент; 3 – инъекционные сваи;
 4 – балка

Исследования взаимодействия комбинированного фундамента с грунтом основания проводились при следующих его геометрических параметрах: ширина подошвы фундамента ($b_{лф}$, м) изменялась от 0,6 до 2,1 м; длина инъекционных свай ($L_{св}$, м) от 3 до 12 м; диаметр сваи ($d_{св}$, м) принимался равным 0,1; 0,2; 0,3 м. Общая нагрузка на комбинированный фундамент ($N_{общ}$), характеризующая его нагружение до и после реконструкции здания, изменялась в зависимости от ширины подошвы ленточного фундамента и обеспечивала заданное давление ($p_{лф}$, кПа) на основание. Нагрузка принималась сосредоточенной на участках длиной 1 погонный метр (п.м.). Усиление ленточного фундамента выполнялось на этапе, когда давление по его подошве $p_{лф}$ становилось больше расчетного сопротивления грунта основания R ($p_{лф} > R$).

Грунты основания, в пределах глубины до 15 м, сложены однородными суглинками, имеющими следующие физико-механические характеристики: плотность грунта $\rho = 1,7 - 1,9 \text{ г/см}^3$; плотность частиц грунта $\rho_s = 2,71 \text{ г/см}^3$; угол внутреннего трения $\varphi = 12 - 22 \text{ град.}$; удельное сцепление $c = 12 - 25 \text{ кПа}$; модуль деформации грунта $E = 5, 10, 15 \text{ МПа}$. В моделируемом основании комбинированного фундамента были выделены уплотненные зоны грунта вокруг инъекционных свай, в которых характеристики грунта принимались с учетом его уплотнения [3].

Для получения данных по осадкам ленточного и комбинированного фундаментов рассматривались следующие этапы моделирования:

1. Моделирование нагружения ленточного фундамента до нагрузки $N_{\text{общ}}$, при которой давление по его подошве $p_{\text{лф}}$ достигало значения расчетного сопротивления грунта основания R ($p_{\text{лф}} = R$). В рассматриваемых грунтовых условиях эта нагрузка на основание, в уровне подошвы фундамента была равна примерно 120 кН/м (участок *a-b*, рис. 2) и являлась безопасной для рассматриваемого здания. Дальнейшее нагружение ленточного фундамента производилось до значения $N_{\text{общ}}$ (кН/м), при котором его осадка достигала предельно допустимой величины, равной $S_u = 10 \text{ см}^1$. Эта нагрузка на основание для рассматриваемых грунтовых условий составляла $N_{\text{общ}} = 500 - 550 \text{ кН/м}$, что соответствовало значению давления по подошве $p_{\text{лф}} = 830 - 920 \text{ кПа}$. По результатам нагружения ленточного фундамента строился соответствующий график осадки (график 1, рис. 2).

2. Моделирование нагружения ленточного фундамента, усиленного примыкающими инъекционными сваями, при котором давление по его подошве превышало значение расчетного сопротивления грунта основания $p_{\text{лф}} > R$. При этом строился соответствующий график осадки комбинированного фундамента (график 2, рис. 2), на котором выделялась нагрузка $N_{\text{общ}}$ (кН/м), соответствующая давлению $p_{\text{ус}}$ по подошве ленточного фундамента после его усиления, равного расчетному сопротивлению грунта основания R ($p_{\text{ус}} = R$). В рассматриваемых грунтовых условиях нагрузка $N_{\text{общ}}$ на комбинированный фундамент была равна 320 – 330 кН/м, которая передается на грунт основания подошвой ленточного фундамента и примыкающими инъекционными сваями [2]. Давление по подошве ленточного фундамента после его усиления

¹ СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*.

p_{yc} равно = 200 кПа. При этом нагрузка на каждую сваю составила $N_{cb} = 104,3$ кН, что в 1,7–1,9 раза меньше несущей способности инъекционной сваи по грунту – $F_d = 175–200$ кН [6, 7]. Таким образом, при выполнении условия $p_{yc} = R$ несущая способность свай и, соответственно, всего комбинированного фундамента имеет значительный запас. Проверка этого условия ($p_{yc} = R$) может выполняться при проектировании усиления фундаментов зданий и сооружений, где предъявляются повышенные требования к их деформациям. Далее комбинированный фундамент нагружался до значения $N_{общ} = 900–950$ кН/м при котором его осадка достигала предельно допустимой величины¹ – $S_u = 10$ см. На графике 2 (рис. 2) была выделена также нагрузка ($N_{общ} = 600–650$ кН/м), при которой ее доля, приходящаяся на одну сваю ($N_{cb} = 193,1$ кН), соответствовала несущей способности сваи по грунту² F_d ($N_{cb} \leq F_d$). При этом условие $N_{cb} \leq F_d$ является основным для обеспечения несущей способности комбинированного фундамента.

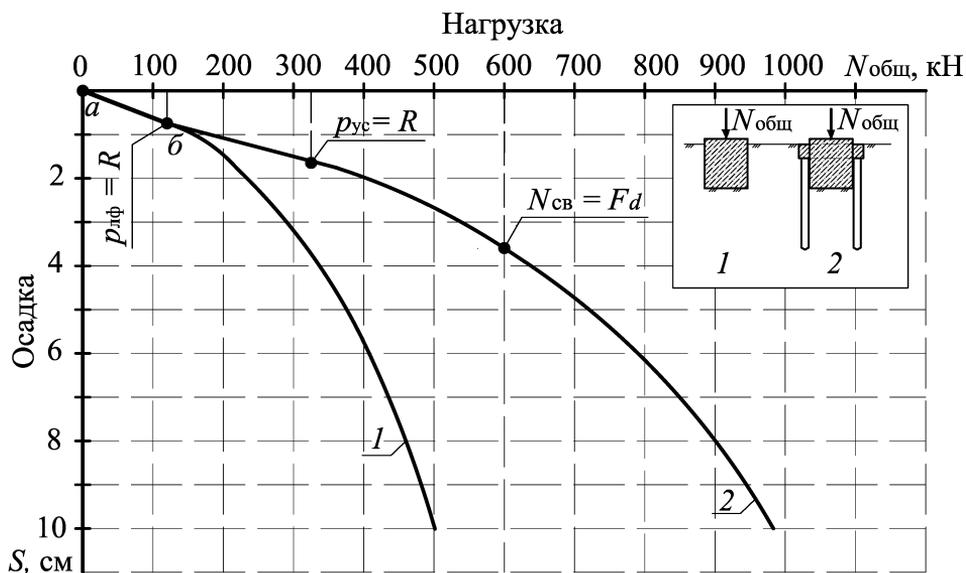


Рис. 2. Графики осадок ленточного и комбинированного фундаментов:

- 1 – осадка ленточного фундамента с шириной подошвы $b_{лф} = 0,6$ м;
- осадка комбинированного фундамента при $b_{лф} = 0,6$ м с примыкающими инъекционными сваями ($L_{cb} = 9$ м; $d_{cb} = 0,2$ м);
- $N_{общ}$ – общая нагрузка на фундаменты (ленточный, комбинированный) на участке длиной 1 п.м.

² СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03 – 85.

Данные графиков (см. рис. 2) показывают эффективность работы комбинированного фундамента в глинистом грунте. Так, в случае усиления ленточного фундамента шириной $b_{\text{лф}} = 0,6$ м примыкающими инъекционными сваями длиной $L_{\text{св}} = 9$ м, диаметром $d_{\text{св}} = 0,2$ м и при обеспечении после его усиления условия $p_{\text{ус}} \leq R$ передаваемая на грунт комбинированным фундаментом нагрузка ($N_{\text{общ}} = 320\text{--}330$ кН/м) будет в 1,5–2,0 раза больше по сравнению с нагрузкой на основание ленточного фундамента ($N_{\text{общ}} = 120$ кН/м) до его усиления. При обеспечении основного условия $N_{\text{св}} \leq F_d$ (см. рис. 2) общая нагрузка, передаваемая на грунт комбинированным фундаментом ($N_{\text{общ}} = 600\text{--}650$ кН/м), значительно возрастает.

При усилении ленточного фундамента инъекционными сваями (или другими видами свай) происходит перераспределение общей нагрузки $N_{\text{общ}}$ между элементами образованного комбинированного фундамента. Авторами разработан подход (получено уравнение), позволяющий определять доли нагрузок, передаваемых на грунт основания ленточным фундаментом и инъекционными сваями при их совместной работе [2]. Этот подход был использован при разработке инженерного метода прогнозирования конечных осадок ленточных фундаментов, усиленных инъекционными сваями в условиях реконструкции зданий.

Конечная полная осадка ленточного фундамента, усиленного инъекционными сваями, с учетом нагрузок до и после реконструкции здания, определяется выражением

$$S = S_{\text{лф}} + S_{\text{ус}}, \quad (1)$$

где S – конечная осадка ленточного фундамента, усиленного инъекционными сваями, за весь период эксплуатации здания, см; $S_{\text{лф}}$ – осадка ленточного фундамента до его усиления (до реконструкции здания), см; $S_{\text{ус}}$ – осадка комбинированного фундамента (ленточного фундамента после его усиления) за период после реконструкции здания, см.

Осадка ленточного фундамента до его усиления $S_{\text{лф}}$ (до реконструкции здания) может определяться экспериментально либо расчетом, например методом послойного суммирования³ и др.

Осадка (конечная) комбинированного фундамента $S_{\text{ус}}$ (см) после реконструкции здания определяется из условия

³ СП 22.13330.2011.

$$S_{yc} = S_{cb} + S_{ad} + \Delta S_{bb}, \quad (2)$$

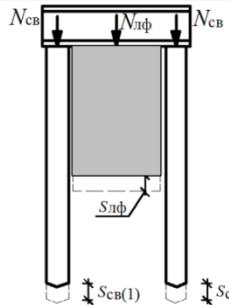
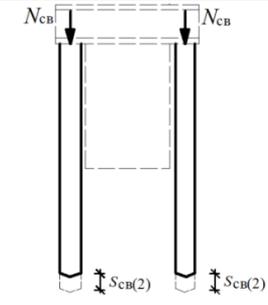
где S_{cb} – осадка одиночной инъекционной сваи, см²; S_{ad} – осадка сваи от влияния на нее близко расположенных одиночных свай (групповой эффект свай)⁴; ΔS_{bb} – приращение осадки комбинированного фундамента от взаимного влияния его конструктивных элементов (инъекционных свай и ленточного фундамента), см.

Осадка одиночной примыкающей инъекционной сваи (S_{cb}) определяется известными методами⁵. При этом, если таких свай устраивается более двух, то дополнительно рекомендуется учитывать и влияние группового эффекта на осадку рассматриваемой сваи от близко расположенных свай⁶ (S_{ad}).

Приращение осадки комбинированного фундамента (ΔS_{bb}) от взаимного влияния его конструктивных элементов определяется на основании уравнения, полученного авторами настоящей статьи. Для этого было смоделировано нагружение комбинированного фундамента при различных его геометрических параметрах и проведены тестовые расчеты (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные осадки элементов комбинированного фундамента

Комбинированный фундамент				Инъекционные сваи		$\Delta S_{bb} = S_{cb(1)} - S_{cb(2)}, \text{ см}$
						
$b_{лф} = 2,1 \text{ м}; L_{cb} = 6 \text{ м}; d_{cb} = 0,2 \text{ м}$						
$N_{общ}, \text{ кН}$	$N_{лф}, \text{ кН}$	$N_{cb}, \text{ кН}$	$S_{лф} = S_{cb(1)}, \text{ см}$	$N_{cb}, \text{ кН}$	$S_{cb(2)}, \text{ см}$	
210	138,0	36,0	1,2	36,0	0,3	0,9

⁴ СП 24.13330.2011.

⁵ СП 22.13330.2011.

⁶ СП 24.13330.2011.

315	196,2	59,4	1,65	59,4	0,5	1,15
420	255,6	82,2	2,1	82,2	0,7	1,4
525	316,4	104,3	2,7	104,3	1,0	1,7
630	378,6	125,7	3,4	125,7	1,3	2,1

Рассматривался ленточный фундамент с шириной подошвы $b_{лф} = 2,1$ м, который усиливался примыкающими инъекционными сваями длиной $L_{св} = 6$ м, диаметром $d_{св} = 0,2$ м. Нагружение комбинированного фундамента производилось в пределах $N_{общ} = 210–630$ кН/м. Доля от общей нагрузки, передаваемая на грунт ленточным фундаментом $N_{лф}$, изменялась в пределах от 138 до 378,6 кН/м, а доля от общей нагрузки $N_{св}$, передаваемая на грунт инъекционными сваями, от 72 до 251,4 кН. Перераспределение общей нагрузки $N_{общ}$ между элементами комбинированного фундамента определялось в соответствии с решениями, опубликованными в работе [2]. На каждом метре длины ленточного фундамента устанавливалось по две сваи. Тогда нагрузка на одну сваю (на участке длиной 1 п.м.) составляла от $N_{св} = 36$ кН до $N_{св} = 125,7$ кН.

Тестовые расчеты, выполненные в ПК Plaxis 3D Foundation, показали, что осадка примыкающих инъекционных свай комбинированного фундамента ($S_{св(1)}$) изменяется от 1,2 до 3,4 см, а осадка отдельных инъекционных свай – без их примыкания к ленточному фундаменту ($S_{св(2)}$) в пределах от 0,9 до 2,1 см (рис. 3). Увеличение осадок инъекционных свай свидетельствует о взаимном влиянии элементов комбинированного фундамента (инъекционных свай и ленточного фундамента). Тогда в рассматриваемом примере приращение осадки инъекционных свай в составе комбинированного фундамента и, следовательно, всего комбинированного фундамента $\Delta S_{вв}$ может быть определена как

$$\Delta S_{вв} = S_{св(1)} - S_{св(2)}. \quad (3)$$

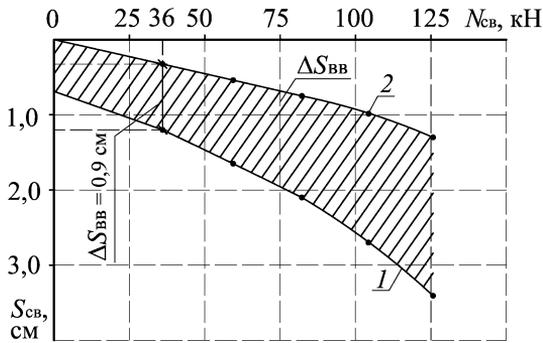


Рис. 3. Результаты моделирования нагружения инъекционных свай: 1 – осадка примыкающих инъекционных свай комбинированного фундамента; 2 – осадка отдельных инъекционных свай без учета их совместной работы с ленточным фундаментом; $N_{св}$ – нагрузка на инъекционную сваю; $\Delta S_{вв}$ – приращение осадки комбинированного фундамента (приращение осадки примыкающих свай комбинированного фундамента) при $b_{лф} = 2,1$ м; $L_{св} = 6$ м; $d_{св} = 0,2$ м

Выполненные расчеты позволили установить зависимости, показывающие влияние конструктивных элементов (инъекционных свай и ленточного фундамента) на приращение осадки комбинированного фундамента $\Delta S_{вв}$ (рис. 4). Поскольку параметр $\Delta S_{вв}$ является определяющим при формировании конечной осадки ленточного фундамента после его усиления $S_{ус}$ (см. формулу 2), полученные закономерности будут справедливы в целом для комбинированного фундамента.

При увеличении длины свай $L_{св}$ приращение осадки $\Delta S_{вв}$ комбинированного фундамента уменьшается (см. рис. 4). Например, при длине инъекционных свай $L_{св} = 3$ м ($d_{св} = 0,2$ м) и ширине подошвы фундамента $b_{лф} = 2,1$ м приращение осадки комбинированного фундамента $\Delta S_{вв}$ от взаимного влияния его конструктивных элементов примерно в 2,7 раза больше ($\Delta S_{вв} = 2,5$ см), чем при $b_{лф} = 0,6$ м ($\Delta S_{вв} = 0,9$ см) при одинаковом давлении по их подошве $p_{ус} = 200$ кПа.

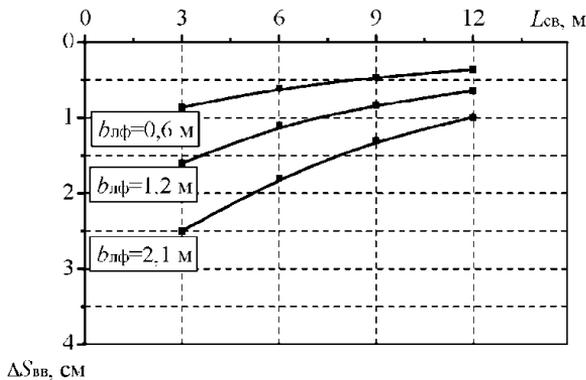


Рис. 4. Приращение осадки комбинированного фундамента $\Delta S_{вв}$ в зависимости от длины свай $L_{св}$ и ширины подошвы фундамента $b_{лф}$: $\Delta S_{вв}$ – приращение осадки комбинированного фундамента, см; $L_{св}$ – длина свай, м; $b_{лф}$ – ширина подошвы ленточного фундамента, м; $d_{св} = 0,2$ м – диаметр свай

Результаты моделирования работы комбинированного фундамента в глинистых грунтах, при его нагружении (см. рис. 4) были обобщены и проанализированы. На основании аппроксимации полученных данных было составлено уравнение, которое позволяет определять приращение осадки комбинированного фундамента от взаимного влияния его конструктивных элементов $\Delta S_{\text{ВВ}}$:

$$\Delta S_{\text{ВВ}} = [\psi_0 + \psi_1 \cdot p_{\text{ус}} + \psi_2 \cdot b_{\text{лф}} + \psi_3 \cdot p_{\text{ус}}^2 + \psi_4 \cdot b_{\text{лф}}^2 + \psi_5 \cdot p_{\text{ус}} \cdot b_{\text{лф}}] \cdot L_{\text{св}} + [\beta_0 + \beta_1 \cdot p_{\text{ус}} + \beta_2 \cdot b_{\text{лф}} + \beta_3 \cdot p_{\text{ус}}^2 + \beta_4 \cdot b_{\text{лф}}^2 + \beta_5 \cdot p_{\text{ус}} \cdot b_{\text{лф}}], \quad (4)$$

где $\psi_0, \psi_1, \psi_2 \dots \psi_5$ и $\beta_0, \beta_1, \beta_2 \dots \beta_5$ – параметры аппроксимации (табл. 2); $p_{\text{ус}}$ – давление по подошве ленточного фундамента после его усиления примыкающими инъекционными сваями, кПа [2]; $L_{\text{св}}$ – длина примыкающей инъекционной сваи, м; $b_{\text{лф}}$ – ширина подошвы ленточного фундамента, м.

В уравнении (4) параметры аппроксимации принимаются при заданных значениях диаметра инъекционных свай $d_{\text{св}}$ и модуле деформации грунта E .

Таблица 2

Значения параметров аппроксимации для уравнения (4)

$d_{\text{св}} = 0,1 \text{ м}$											
$E = 5 \text{ МПа}$				$E = 10 \text{ МПа}$				$E = 15 \text{ МПа}$			
ψ_0	-0,025	β_0	0,516	ψ_0	-0,025	β_0	0,519	ψ_0	-0,025	β_0	0,544
ψ_1	$-3,681 \cdot 10^{-4}$	β_1	$6,231 \cdot 10^{-3}$	ψ_1	$-1,476 \cdot 10^{-4}$	β_1	$2,089 \cdot 10^{-3}$	ψ_1	$-5,064 \cdot 10^{-5}$	β_1	$1,299 \cdot 10^{-4}$
ψ_2	$2,25 \cdot 10^{-4}$	β_2	$2,294 \cdot 10^{-4}$	ψ_2	$2,25 \cdot 10^{-4}$	β_2	$2,3 \cdot 10^{-4}$	ψ_2	$2,25 \cdot 10^{-4}$	β_2	$9,028 \cdot 10^{-4}$
ψ_3	$5,859 \cdot 10^{-7}$	β_3	$\frac{-9,484 \cdot 10^{-6}}{6}$	ψ_3	$3,771 \cdot 10^{-7}$	β_3	$-4,973 \cdot 10^{-6}$	ψ_3	$1,522 \cdot 10^{-7}$	β_3	$-8,636 \cdot 10^{-7}$
ψ_4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	β_4	$3,135 \cdot 10^{-3}$	ψ_4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	β_4	$3,404 \cdot 10^{-3}$	ψ_4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	β_4	0,01
ψ_5	$-3,877 \cdot 10^{-4}$	β_5	$6,418 \cdot 10^{-3}$	ψ_5	$-2,681 \cdot 10^{-4}$	β_5	$4,174 \cdot 10^{-3}$	ψ_5	$-1,529 \cdot 10^{-4}$	β_5	$2,225 \cdot 10^{-3}$
$\delta, \%$	12,5			10,2				11,8			
$d_{\text{св}} = 0,2 \text{ м}$											
$E = 5 \text{ МПа}$				$E = 10 \text{ МПа}$				$E = 15 \text{ МПа}$			
ψ_0	-0,025	β_0	0,52	ψ_0	-0,025	β_0	0,515	ψ_0	-0,025	β_0	0,541
ψ_1	$-3,355 \cdot 10^{-4}$	β_1	$5,77 \cdot 10^{-3}$	ψ_1	$-1,156 \cdot 10^{-4}$	β_1	$1,826 \cdot 10^{-3}$	ψ_1	$-3,527 \cdot 10^{-5}$	β_1	$-2,755 \cdot 10^{-6}$
ψ_2	$2,25 \cdot 10^{-4}$	β_2	$2,295 \cdot 10^{-4}$	ψ_2	$2,25 \cdot 10^{-4}$	β_2	$9,022 \cdot 10^{-4}$	ψ_2	$2,25 \cdot 10^{-4}$	β_2	$9,027 \cdot 10^{-4}$
ψ_3	$5,46 \cdot 10^{-7}$	β_3	$\frac{-8,326 \cdot 10^{-6}}{6}$	ψ_3	$2,635 \cdot 10^{-7}$	β_3	$-3,057 \cdot 10^{-6}$	ψ_3	$9,908 \cdot 10^{-8}$	β_3	$-4,884 \cdot 10^{-7}$
ψ_4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	β_4	$3,166 \cdot 10^{-3}$	ψ_4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	β_4	0,01	ψ_4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	β_4	0,01
ψ_5	$-3,817 \cdot 10^{-4}$	β_5	$6,055 \cdot 10^{-3}$	ψ_5	$-2,411 \cdot 10^{-4}$	β_5	$3,496 \cdot 10^{-3}$	ψ_5	$-1,399 \cdot 10^{-4}$	β_5	$2,094 \cdot 10^{-3}$

$\delta, \%$	10,2				10,0				11,6			
$d_{св} = 0,3 \text{ м}$												
$E = 5 \text{ МПа}$				$E = 10 \text{ МПа}$				$E = 15 \text{ МПа}$				
ψ_0	-0,025	β_0	0,536	ψ_0	-0,025	β_0	0,532	ψ_0	-0,025	β_0	0,53	
ψ_1	$-2,866 \cdot 10^{-4}$	β_1	$5,366 \cdot 10^{-3}$	ψ_1	$-7,119 \cdot 10^{-5}$	β_1	$1,225 \cdot 10^{-3}$	ψ_1	$1,444 \cdot 10^{-6}$	β_1	$-3,019 \cdot 10^{-4}$	
ψ_2	$2,25 \cdot 10^{-4}$	β_2	$2,296 \cdot 10^{-4}$	ψ_2	$2,25 \cdot 10^{-4}$	β_2	$9,023 \cdot 10^{-4}$	ψ_2	$2,25 \cdot 10^{-4}$	β_2	$9,028 \cdot 10^{-4}$	
ψ_3	$4,272 \cdot 10^{-7}$	β_3	$-7,241 \cdot 10^{-6}$	ψ_3	$1,409 \cdot 10^{-7}$	β_3	$-1,517 \cdot 10^{-6}$	ψ_3	$1,217 \cdot 10^{-8}$	β_3	$8,616 \cdot 10^{-7}$	
ψ_4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	β_4	$3,164 \cdot 10^{-3}$	ψ_4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	β_4	0,01	ψ_4	$2,5 \cdot 10^{-3}$	β_4	0,011	
ψ_5	$-3,666 \cdot 10^{-4}$	β_5	$5,814 \cdot 10^{-3}$	ψ_5	$-2,244 \cdot 10^{-4}$	β_5	$3,225 \cdot 10^{-3}$	ψ_5	$-1,3 \cdot 10^{-4}$	β_5	$1,693 \cdot 10^{-3}$	
$\delta, \%$	12,2				10,3				13,3			

δ – относительная среднеквадратичная погрешность аппроксимации, %. Промежуточные значения параметров и характеристик грунтов определяются интерполяцией.

Таким образом, на основании выполненных исследований показан подход к определению конечной осадки комбинированного фундамента с учетом совместной работы ленточного фундамента и примыкающих инъекционных свай в глинистом грунте в условиях реконструкции и восстановления зданий.

Выводы

1. На основании результатов исследований поведения ленточного фундамента, усиленного примыкающими инъекционными сваями, *разработан подход* к определению конечной осадки комбинированного фундамента с учетом совместной работы его элементов в однородном глинистом грунте в условиях реконструкции и восстановления зданий.

2. Выполненные исследования показывают *эффективность работы комбинированного фундамента* (ленточного фундамента после его усиления инъекционными сваями) в глинистом грунте. Например, в случае усиления ленточного фундамента с шириной подошвы $b_{лф} = 0,6 \text{ м}$ примыкающими инъекционными сваями длиной $L_{св} = 9 \text{ м}$, диаметром $d_{св} = 0,2 \text{ м}$ передаваемая на глинистый грунт комбинированным фундаментом нагрузка будет в 1,8–2,5 раза больше по сравнению с нагрузкой на грунт основания, передаваемой ленточным фундаментом до его усиления (при давлении по подошве ленточного фундамента после его усиления $p_{ус} \leq R$).

3. Установлено, что при усилении ленточного фундамента инъекционными сваями происходит *перераспределение общей нагрузки* между

элементами образованного комбинированного фундамента. Выявлено, что при нагружении комбинированного фундамента в однородном глинистом грунте возникает *приращение осадки* $\Delta S_{\text{вв}}$ от взаимного влияния его конструктивных элементов (инъекционных свай и ленточного фундамента). Так, при длине инъекционных свай $L_{\text{св}} = 3$ м и диаметре $d_{\text{св}} = 0,2$ м приращение осадки комбинированного фундамента $\Delta S_{\text{вв}}$ при ширине подошвы $b_{\text{лф}} = 2,1$ м примерно в 2,7 раза больше, чем при $b_{\text{лф}} = 0,6$ м, при одинаковом давлении по подошве фундамента $p_{\text{ус}} = 200$ кПа.

Библиографический список

1. Полищук А.И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий. – 3-е изд., доп. – Нортхэмптон: STT; Томск: STT, 2007. – 476 с.

2. Полищук А.И. Самарин Д.Г., Филиппович А.А. Оценка загрузки ленточных фундаментов в однородных глинистых грунтах при их усилении инъекционными сваями // Вестник ТГАСУ. – Томск, 2013. – № 4. – С. 256–262.

3. Петухов А.А. Совершенствование способа устройства инъекционных свай в слабых глинистых грунтах для условий реконструкции зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2006. – 22 с.

4. Yamashita K., Yamada T., Hamada J. Recent case histories on monitoring settlement and load sharing of piled rafts in Japan // Deep foundations on bored and auger piles. Van Impe & Van Impe (eds). – Taylor & Francis Group, London, 2009. – P. 181–193.

5. Brandl H. Micropiles for underpinning/undercrossing of historical buildings // Conference Reconstruction of Historical cities and geotechnical engineering. – St.Petersburg, 2003. – P. 119–126.

6. PLAXIS 3D Foundation. Vol. 1., edby. R.B.J. Brinkgreve, W. Broere. – Abingdon e.a.: Balkema, 2004.

7. Шалгинов Р.В. Совершенствование метода расчета инъекционных свай в глинистых грунтах для условий реконструкции зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2010. – 23 с.

8. Полищук А.И. Усиление оснований и фундаментов зданий и сооружений // Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева. – М.: АСВ, 2014. – 728 с.

References

1. Polishchuk A.I. Osnovi proektirovaniya i ustroystva fundamentov rekonstruiruemikh zdaniy [The basics of design and construction of reconstructed buildings foundations]. Northampton: STT; Tomsk: STT, 2007. 476 s.

2. Polishchuk A.I., Samarин D.G., Filippovich A.A. Otsenka zagruzeniya lentochnykh fundamentov v odnorodnykh glinistikh gruntakh pri ih usilenii in"ektsionnymi svayami [The evaluation of shallow foundations loading while their strengthening with injection piles]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2013, no 4 (38), pp. 256-262.

3. Petukhov A.A. Sovershenstvovanie sposoba ustroystva in"ektsionnykh svay v slabykh glinistyx gruntakh dlia usloviy rekonstrukcii zdaniy [The perfection of injection pile calculation method in clay soils for the conditions of buildings reconstruction]. Abstract of the thesis of the candidate of technical sciences, Tomsk, 2006. 22 s.

4. Yamashita K., Yamada T, Hamada J. Recent case histories on monitoring settlement and load sharing of piled rafts in Japan. *Deep foundations on bored and auger piles*, Van Impe & Van Impe (eds). Taylor & Francis Group. London, 2009. pp. 181-193.

5. Brandl H. Micropiles for underpinning/undercrossing of historical buildings. *Conference Reconstruction of Historical cities and geotechnical engineering*, St.Petersburg. 2003. pp. 119-126.

6. PLAXIS 3D Foundation. Vol. 1, ed. by. R.B.J. Brinkgreve & W. Broere. Abingdon e.a.: Balkema, 2004.

7. Shalginov R.V. Sovershenstvovanie metoda rascheta in"ektsionnykh svay v glinistikh gruntakh dlia uslovii rekonstrukcii zdaniy [The perfection of injection pile calculation method in clay soils for the conditions of buildings reconstruction]. Abstract of the candidate of technical sciences, Tumen, 2010. 23 s.

8. Spravochnik geotekhnika. Osnovania, fundamenti i podzemnie sooruzeniya [Bags foundations and underground structures] ed by Ilichev V.A., Mangushev R.A. Moscow: ACB, 2014. 728 s.

Об авторах

Полищук Анатолий Иванович (Краснодар, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Основания и фундаменты» Кубанского государственного аграрного университета; e-mail: ofpai@mail.ru

Самарин Дмитрий Геннадьевич (Томск, Россия) – кандидат технических наук, доцент Томского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: sdgsamara@mail.ru

Осипов Сергей Павлович (Томск, Россия) – кандидат технических наук, доцент Томского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: osip1809@rambler.ru

Филиппович Анна Александровна (Томск, Россия) – аспирантка Томского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: annafilich@mail.ru

About the authors

Polyschuk Anatoliy Ivanovich (Krasnodar, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of department «Bases and foundations», Kuban State Agrarian University (KSAU); e-mail: ofpai@mail.ru

Samarin Dmitry Gennadievich (Tomsk, Russian Federation) – Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: sdgsamara@mail.ru

Osipov Sergey Pavlovich (Tomsk, Russian Federation) – Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: osip1809@rambler.ru

Filippovich Anna Aleksandrovna (Tomsk, Russian Federation) – Postgraduate Student, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: annafilich@mail.ru

Получено 25.03.2014