

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ИЗ БЕТОНОВ И РАСТВОРОВ НА НАПРЯГАЮЩЕМ ЦЕМЕНТЕ ПРИ РАБОТЕ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ СТАТИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ

А. Н. Невейков¹, П. С. Пойма²

¹ М. т. н., ст. преп. кафедры строительных технологий и конструкций УО «БелГУТ», Гомель, Беларусь, neva81@tut.by

² Д. т. н., профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций УО «БрГТУ», Брест, Беларусь

Реферат

В статье представлена методика расчета несущей способности буронабивных свай из бетонов и растворов на напрягающем цементе при работе на вертикальную статическую нагрузку, сравнение результатов расчета по предлагаемой методике с экспериментальными данными и другими методами расчета буронабивных свай. Методика позволяет определить рекомендуемые границы расположения бетонов и растворов на напрягающем цементе в свае, напряжения и деформации грунта вдоль боковой поверхности и под нижним концом сваи, повышение несущей способности сваи.

Ключевые слова: буронабивные сваи, напрягающий цемент, вертикальная статическая нагрузка, несущая способность.

THE METHODOLOGY FOR CALCULATING THE BEARING CAPACITY OF BORED PILES OF CONCRETES AND MORTARS ON EXPANSIVE CEMENT UNDER AXIAL STATIC LOAD

A. N. Nevejkov, P. S. Pojta

Abstract

The article presents the methodology for calculating the bearing capacity of bored piles of concretes and mortars on expansive cement under axial static load, comparing the calculation results by the proposed method with experimental data and other methods for calculating bored piles. The technique allows you to determine the recommended boundaries of the location of concretes and mortars on expansive cement in the pile, stress and soil deformation along the side surface and under base of the pile, increasing the bearing capacity of the pile.

Keywords: bored piles, expansive cement, axial static load, bearing capacity.

Введение

Ограниченность территорий для строительства в черте города, высокая их стоимость вынуждают уплотнять существующую застройку, повышать этажность зданий, что сопровождается ростом нагрузок на фундаменты. Эти обстоятельства предъявляют повышенные требования к надежности работы оснований и фундаментов и не позволяют использовать фундаменты, возводимые в открытых котлованах, забивные и набивные сваи без дополнительных мероприятий, даже при залегании у поверхности сравнительно прочных грунтов. Эффективным решением данной проблемы является применение буронабивных свай, в мировой практике на долю таких свай приходится более 50-60% от общего объема применяемых свайных фундаментов [1]. Расширение применения таких свай заставило искать пути повышения их эффективности, одним из которых является применение бетонов и растворов на напрягающем цементе (далее бетонов на НЦ) взамен традиционных бетонов и растворов на портландцементе [2, 3]. Опыт применения бетонов на НЦ показал свою эффективность, обеспечив существенное повышение несущей способности свай. Расширение ствола сваи создало дополнительное давление на грунт, снизило разуплотнение скважины, улучшило контакт сваи с грунтом, привело к повышению несущей способности сваи [4]. Однако очевидно, что проблема применения свай из бетонов на НЦ не может быть сведена к подбору приемлемого их состава без разработки методики расчета таких свай.

1. Расчетные предпосылки и методика расчета

Наиболее распространенной нагрузкой, действующей на сваи, является вертикальная статическая нагрузка, которая передается и распределяется на окружающий сваю грунтовый массив через боковую поверхность и нижний конец сваи. Несущая способность (F_d) буронабивной сваи без уширения при действии вертикальной нагрузки (N) определяется как сумма несущих способностей нижнего конца сваи (F_{dA}) и ее боковой поверхности (F_{du}):

$$F_d = F_{dA} + F_{du} \quad (1)$$

Несущая способность боковой поверхности сваи (F_{du}) рассчитывается путем суммирования сопротивлений грунта по боковой поверхности на всей длине сваи:

$$F_{du} = \int_0^L \tau_{\max} \cdot U \cdot dz, \quad (2a)$$

где τ_{\max} – предельное сопротивление грунта по боковой поверхности сваи на глубине z ,

U – периметр сваи на глубине z ,

L – длина сваи в грунте.

Несущая способность нижнего конца сваи (F_{dA}) определяется по сопротивлению грунта под нижним концом сваи по зависимости:

$$F_{dA} = A \cdot \sigma_{\max}, \quad (2b)$$

где σ_{\max} – предельное сопротивление грунта под нижним концом сваи;

A – площадь нижнего конца сваи.

Из анализа формул можно заключить, что увеличение каждой компоненты приведет к увеличению общей нагрузки, воспринимаемой буронабивной свай без уширения. При неизменной геометрии сваи и физико-механических свойствах грунта применение бетонов на НЦ приведет к преднапряжению грунта и повышению сопротивлений по боковой поверхности и под нижним концом сваи [4], что необходимо учесть в расчете. Тогда с учетом применения бетонов на НЦ запишем τ_{\max} и σ_{\max} из формул (2) в виде:

$$\tau_{\max} = \tau_N + \tau_C; \quad (3a)$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_N + \sigma_C, \quad (3b)$$

где τ_N – предельное сопротивление грунта по боковой поверхности сваи, обусловленное ее устройством и природным состоянием грунта на глубине z ,

τ_C – повышение предельного сопротивления грунта по боковой поверхности сваи (τ_N), обусловленное применением бетонов на НЦ на глубине Z ;

σ_N – предельное сопротивление грунта под нижним концом сваи, обусловленное ее устройством и природным состоянием грунта на глубине Z ;

σ_C – повышение предельного сопротивления грунта под нижним концом сваи (σ_N), обусловленное применением бетонов на НЦ на глубине Z .

В дальнейшем при разработке методики расчета принят ряд допущений:

- характеристики грунта в природном состоянии известны и постоянны;
- природное напряженно-деформированное состояние грунта не изменяется при устройстве сваи;
- напряженно-деформированное состояние грунта вокруг сваи формируется под влиянием природного состояния грунта и расширения ствола сваи из бетонов на НЦ;
- относительные деформации расширения ствола сваи при расширении бетонов на НЦ при наличии пространственного арматурного каркаса принимаем равными нулю;
- относительные деформации расширения бетонов на НЦ в стволе сваи без армирования имеют постоянный закон распределения, и расширение ствола сваи происходит равномерно;
- бетон при нагружении сваи принимаем как абсолютно упругий материал;
- повышение сопротивлений грунта за счет расширения бетонов на НЦ по боковой поверхности описывается зависимостью закона сопротивления грунта сдвигу (Ш. Кулона), а под нижним концом сваи – зависимостью Ф. Шлейхера.

В соответствии со сказанным выше запишем τ_{max} и σ_{max} для дальнейших расчетов в следующем виде, учитывающем природное состояние грунта по ТКП45-5.01-254:

$$\tau_{max} = \tau_N + \tau_C = R_f + \psi \cdot P_C \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + c_i; \quad (4a)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_N + \sigma_C = R + \frac{\psi \cdot w_C \cdot E}{2r_C \cdot \omega \cdot (1 - \mu^2)}, \quad (46)$$

где R_f – расчетное сопротивление грунта боковой поверхности сваи по ТКП45-5.01-254;

R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи по ТКП45-5.01-254;

ψ – коэффициент релаксации горизонтальных напряжений в грунте от расширения скважины бетонами на НЦ, определяемый по данным Аль Масри [5] и Ф. К. Лапшина [6];

P_C – горизонтальное напряжение по боковой поверхности сваи на глубине Z , обусловленное расширением скважины бетонами на НЦ и определяемое решением Ф. К. Лапшина [6];

w_C – перемещение нижнего конца сваи при расширении бетонов на НЦ, определяемое из рассмотрения напряженно-деформированного состояния ствола сваи [7].

С учетом рассмотрения напряженно-деформированного состояния сваи из бетонов на НЦ и грунта, ее окружающего [7, 8], преобразуем известную методику расчета несущей способности буронабивной сваи, принятую в ТКП45-5.01-254, в методику расчета, учитывающую применение бетонов на НЦ. Разработка теоретических положений [7, 8] методики расчета несущей способности буронабивных свай из бетонов на НЦ выполнена по расчетным схемам на рисунках 1 и 2.

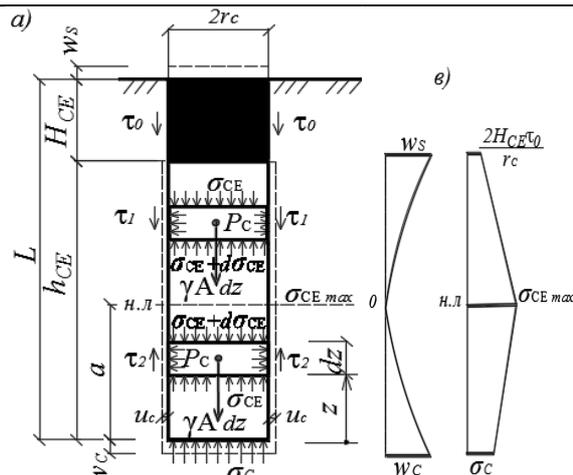


Рисунок 1 – Расчетная схема буронабивной сваи (а) и напряжений (б) в бетоне на напрягающем цементе

Тогда несущую способность защемленной в грунте одиночной буронабивной сваи из напрягающих бетонов и растворов (F_d , кН) определим согласно рисунку 2 по алгоритму таблицы 1 на основании табличного способа расчета несущей способности буронабивных свай по ТКП45-5.01-254 с учетом повышения сопротивлений грунта основания под нижним концом и по боковой поверхности бетоны на НЦ по формуле:

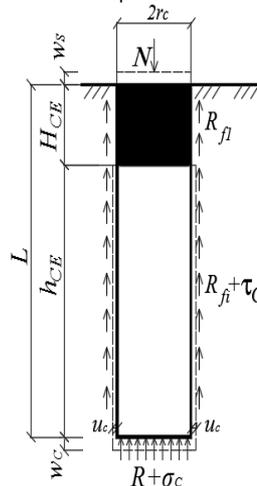


Рисунок 2 – Расчетная схема буронабивной сваи при нагружении вертикальной статической нагрузкой

$$F_d = \gamma_C [\gamma_{CR} \cdot A \cdot (R + \sigma_C) + \sum_0^L (\gamma_{Cfi} \cdot u_i \cdot h_i \cdot (R_f + \tau_{Ci}))], \quad (5)$$

где γ_C , γ_{CR} , γ_{Cf} – коэффициент условий работы сваи и грунта по ТКП45-5.01-254;

A – площадь опирания на грунт нижнего конца (уширения) сваи, м²;

U_i – усредненный периметр поперечного сечения ствола в i -м слое грунта, м;

h_i – мощность i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м;

σ_C – повышения расчетного сопротивления грунта под нижним концом сваи R за счет расширения бетонов и растворов на НЦ, кПа;

τ_C – повышения расчетного сопротивления грунта по боковой поверхности R_{fi} за счет расширения бетонов и растворов на НЦ, кПа.

2. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными

Для оценки достоверности разработанной методики расчета несущей способности буронабивных свай из бетонов на НЦ по грунту при их работе на вертикальную статическую нагрузку проведена апробация

Таблица 1 – Алгоритм расчета буронабивной сваи из напрягающих бетонов и растворов

Рассчитываемый параметр и расчетные формулы в алгоритме расчета	
1. Анализ инженерно-геологических условий с определением характеристик грунтов (γ ; c ; φ ; E) выбором технологии изготовления буронабивной сваи	
2. Назначение геометрии сваи (L_C , r_C), характеристик материалов сваи (ε_{C0} ; σ_{CE} ; E_C), коэффициента пористости грунта под нижним концом сваи (e_1)	
3. Вычисление по (e_1) требуемого перемещения нижнего конца сваи и боковой поверхности сваи:	
4. Вычисление рекомендуемой высоты напрягающего бетона (h_{CE}) и глубину расположения (H_{CE}):	$h_{CE} = \frac{(e_0 - e_1)3r_C + S_{сб}(1 + e_0)}{(1 + e_0)\varepsilon_{C0} \cdot k_\varepsilon}; \quad H_{CE} = \frac{17,12r_C + 2\psi P_C - 2 \cdot c_i \cdot \text{tg}^2(45^\circ + \varphi_i / 2)}{\gamma_C \text{tg}^2(45^\circ + \varphi_i / 2)},$
где $P_C = (1 + \sin \varphi_i)(\sigma_0 + c_i \cdot \text{ctg} \varphi_i) \left(\frac{\varepsilon_{C0} k_\varepsilon E}{\sin \varphi_i \cdot (1 + \mu)(\sigma_0 + c_i \cdot \text{ctg} \varphi_i)} \right)^{\frac{\sin \varphi_i}{1 + \sin \varphi_i}} - c \cdot \text{ctg} \varphi_i$; $\psi = \frac{1}{1 + 2 \sin \varphi_i}$	
5. Определение табличных значений расчетных сопротивления грунта R и R_{fi} для каждого слоя грунта h_i по ТКП 45-5.01-254	
6. Вычисление сопротивлений грунта сдвигу по боковой поверхности сваи T_i для каждого слоя грунта h_i и осредненных сопротивлений грунта сдвигу T_0 ; T_1 ; T_2 , причем в большинстве расчетов можно принять $T_1 = T_2 = T_{\max}$:	$\tau_i = R_{fi} + T_{ci}; \quad T_{0,1,2} = \frac{\sum \tau_i \cdot h_i}{\sum h_i}, \quad \text{где } T_{ci} = \psi_i \cdot P_{ci} \cdot \text{tg} \varphi_{fi} + c_{fi}$
7. Вычисление распределения напряжений (σ_{CE}) и перемещений (W) в стволе сваи из бетона на НЦ при $T_1 = T_2 = T_{\max}$, с учетом обозначений $A = \frac{\gamma_C}{E_C}$; $B = \frac{2T_{\max}}{E_C r_C}$; $C = \frac{\psi E}{2r_C \cdot \omega \cdot (1 - \mu^2) \cdot E_C}$; $D = \frac{2\pi_0}{r_C E_C}$	
- для нижнего участка сваи $z \in [0; a]$:	$\sigma_{CE,C}(Z) = \frac{(A - B)(a^2 C + 2z - 2aCz) - 2aC\varepsilon_{C0}}{-2 + 2aC} E_C; \quad w_C(z) = \frac{(a - z)(2\varepsilon_{C0} + (A - B)(-a - z + aCz))}{-2 + 2aC}$
- для верхнего участка сваи $z \in [a; h_{CE}]$:	$\sigma_{CE,S}(Z) = DE_C + (A + B)(h_{CE} - z)E_C; \quad w_S(z) = \frac{-(a - z)(2\varepsilon_{C0} - 2Ah_{CE} - 2Bh_{CE} + a(A + B) - 2D + Az + Bz)}{2};$
Расстояние a определяем из условия: $\sigma_{CE,S}(a) = \sigma_{CE,C}(a) = \sigma_{CE\max}$, при $z=a$ и вычисляем $w_C(0)$ при $z=0$	
8. Проверка условий:	$S_{сб} \leq w_S; \quad S_{сб} \leq w_{\min} \leq w_C, \quad \text{где } S_{сб} = \frac{5 + 100 \cdot I_p \cdot I_L}{1000}; \quad w_{\min} = \frac{(e_0 - e_1) \cdot 3r_C}{(1 + e_0)}$
9. Вычисление повышения расчетных сопротивлений (σ_C) и (T_C) для каждого слоя h_i :	$\sigma_C = \psi \cdot \frac{w_C(0) \cdot E}{2r_C \cdot \omega \cdot (1 - \mu^2)}; \quad T_{ci} = \psi_i \cdot P_{ci} \cdot \text{tg} \varphi_{fi} + c_{fi}$
10. Определение значений коэффициентов (γ_C , γ_{Cfi} , γ_{CR}) и расчет несущей способности буронабивной сваи и допустимой нагрузки на сваю с учетом применения напрягающих бетонов:	$F_d = \gamma_C [\gamma_{CR} \cdot A \cdot (R + \sigma_C) + \sum_0^L (\gamma_{Cfi} \cdot u_i \cdot h_i \cdot (R_{fi} + \tau_{ci}))]; \quad F = F_d / \gamma_k$
Примечание : в формулах таблицы приняты следующие обозначения:	
c_i , φ_i – прочностные характеристики грунта вдоль боковой поверхности сваи; e_0 , e_1 – коэффициенты пористости грунта природного сложения (шлама) и уплотненного; E , E_C – модули деформации грунта и упругости напрягающего бетона;	
γ , γ_C – удельные веса грунта и бетона на НЦ; L_C , r_C – геометрические размеры сваи (защемление сваи в грунте и радиус сваи); ε_{C0} – относительное свободное расширение бетонов на НЦ; σ_{CE} – самонапряжение бетонов на НЦ; h_{CE} – высота бетона на НЦ в стволе сваи; H_{CE} – глубина расположения бетона на НЦ в стволе сваи от уровня земли; P_C – горизонтальное напряжение по боковой поверхности сваи на глубине Z , обусловленные расширением скважины бетонами на НЦ; σ_0 – горизонтальное напряжение от собственного веса грунта на глубине Z ; ψ – коэффициент релаксации горизонтального напряжения в грунте; k_ε – коэффициент снижения свободного расширения бетонов на НЦ в стволе буронабивной сваи, принимаемый не менее 0,9; T_0 , T_1 , T_2 – осредненные сопротивления грунта сдвигу вдоль боковой поверхности сваи; u_C , w_C , w_S – перемещения боковой поверхности, нижнего и верхнего конца сваи при расширении бетона на НЦ; w_{\min} – требуемое перемещение нижнего конца сваи; $S_{сб}$ – сдвиговая осадка грунта	

разработанной методики расчета и широко применимых методов расчета (табличный способ расчета по ТКП 45-5.01-254 и расчет методом конечных элементов в ПК «Plaxis») на сваях из бетонов на НЦ, испытанных в большом геотехническом лотке [4] и на строительных площадках Республики Беларусь [9] (всего 7 испытаний). Сравнимыми параметрами при расчетах являлись несущая способность сваи по грунту и допустимая нагрузка на сваю. Все результаты расчетов сведены в таблице 2 и обобщены на диаграммах рисунка 3.

На рисунке 3 по полученным результатам в соответствии с ТКП ЕН 1990 представлены сравнительные диаграммы опытных и рас-

считанных значений несущей способности и допустимой нагрузки для свай из бетонов на НЦ при различных способах определения несущей способности свай по грунту. Точками на диаграммах обозначены опытные и рассчитанные значения несущей способности свай (допустимой нагрузки на сваю). Диагонали, выделенные пунктиром на диаграммах, соответствуют условию совпадения опытных значений с расчетными значениями. Для каждого из способов определения несущей способности свай по грунту на диаграммах построены линейные зависимости вида:

Таблица 2 – Сравнительный анализ методов расчета несущей способности свай

Объект	Характеристика объекта			Несущая способность сваи, кН (отклонение от опытного значения, %)			
	Тип сваи	Диаметр и длина сваи	Тип грунта и его характеристики по боковой поверхности уширения и под нижним концом сваи	Опытное значение	Методика автора	Методика ТНПА	МКЭ
Большой геотехнический лоток	Серия 2 (ПЦ)	ø310×1900	Песок мелкий средней прочности: ρ = 1,66..1,68 г/см ³ ; e = 0,71-0,73; φ = 34,2..34,6°; c = 3,2..3,6 кПа; E = 9-10 МПа	53,6*	---	61,2 (+14,2)	47,0 (-12,3)
	Серия 2 (НЦ)			63,8*	70,3 (+10,2)	---	59,0 (-7,5)
	Прирост за счет НЦ			+18,9%	+14,9%	+25,5%	
	Серия 3 (ПЦ)	ø 205×1900	Песок мелкий средней прочности: ρ = 1,66..1,68 г/см ³ ; e = 0,71-0,73; φ = 34,2..34,6°; c = 3,2..3,6 кПа; E = 9-10 МПа	28,3*	---	31,9 (+12,7)	27,0 (-4,6)
	Серия 3 (НЦ)			34,3*	37,4 (+9,1)	---	33,5 (-2,3)
	Прирост за счет НЦ			+21,2%	+17,2%	+24,1%	
	Серия 4 (ПЦ)	ø 205×1900	Песок мелкий средней прочности: ρ = 1,66..1,68 г/см ³ ; e = 0,71-0,73; φ = 34,2..34,6°; c = 3,20..3,60 кПа; E = 9-10 МПа	28,3*	---	32,0 (+13,1)	27,0 (-4,6)
	Серия 4 (НЦ)			38,2*	38,3 (+0,3)	---	37,0 (-3,1)
Прирост за счет НЦ				+34,9%	+19,8%	+37,0%	
№1	A1(ПЦ)	ø1220×14000 (22000)	Глина мягкопластичная: ρ=1,95 г/см ³ ; e = 0,95; I _L = 0,65 φ = 10 0; c = 33 кПа; E = 9 МПа	1780**	---	1790 (+0,6)	1789 (0,0)
	A1(НЦ)			2020**	2000 (-1,0)	---	2020 (0,0)
	Прирост за счет НЦ			13,5%	+11,8%	13,5%	
№2	A2(ПЦ)	ø 150×11500	Песок гравелистый прочный: ρ=1,82 г/см ³ ; e = 0,55; φ = 37,00; c = 1,0 кПа; E = 40 МПа	280	---	234,1 (-16,4)	---***
	A2(НЦ)			330	350,8 (+6,3)	---	---***
	Прирост за счет НЦ			+17,9%	+49,8%		
	A3(ПЦ)	ø 120×9000	Песок гравелистый прочный: ρ=1,82 г/см ³ ; e = 0,55; φ = 37,00; c = 1,0 кПа; E = 40 МПа	115	---	122,6 (+6,7)	---***
	A3(НЦ)			140	178,3 (+27,3)	---	---***
Прирост за счет НЦ			+21,8%	45,4%			
№3	A4(ПЦ)	ø 250×5600	Песок средний средней прочности: ρ=1,74 г/см ³ ; e = 0,55; φ = 36,00; c = 1,0 кПа; E = 33 МПа	188	---	192,5 (+2,4)	172,8 (-8,1)
	A4(НЦ)			228	239,1 (+4,9)	---	207,3 (-9,1)
	Прирост за счет НЦ			+21,3%	+24,2%	20,0%	
	A5(ПЦ)	ø 250×5600	Супесь моренная очень прочная: ρ=2,04 г/см ³ ; e = 0,55; I _L =0,1; φ = 31,00; c = 44,0 кПа; E = 46 МПа	206	---	207,6 (+1,0)	227,6 (+10,6)
	A5(НЦ)			262	288,7 (+10,2)	---	281,5 (+7,4)
Прирост за счет НЦ			+27,3%	39,1%	23,7%		

Примечания:

Объект № 1 – Реконструкция пешеходного вантового моста в районе пограничного знака № 1265 через реку Буг на остров Пограничный в г. Бресте» (несущая способность свай получена МКЭ).

Объект № 2 – ОАО «Белорусский автомобильный завод». Создание мощностей по выпуску большегрузных карьерных самосвалов в г. Жодино. Подпорная стена.

Объект № 3 – Электрификация участков Гомель-Жлобин-Осиновичи и Жлобин-Калинковичи. 2-я очередь. Участок Гомель – Жлобин. УП «Белорусская железная дорога».

В скобках () приведено отклонение расчетного значения несущей способности от опытного значения в %.

«*» - Опытное значение несущей способности сваи принято осреднением результатов испытаний свай в серии.

«**» - Опытное значение несущей способности сваи принято по данным расчета несущей способности сваи МКЭ.

«***» - Значение несущей способности МКЭ не определяли, т. к. опытные анкерные сваи выполнены под наклоном.

$$F_u = b \cdot F_d; \quad (5)$$

$$F_{exp} = b \cdot F_{calc}, \quad (6)$$

где *b* – поправочный коэффициент, полученный на основе статистической обработки экспериментальных и расчетных данных по ТКП EN 1990-2011;

F_u – опытное значение несущей способности сваи, кН;

F_d – расчетное значение несущей способности сваи, кН;

F_{exp} – опытное значение допускаемой нагрузки на сваю, кН;

F_{calc} – расчетная значение допускаемой нагрузки на сваю, кН.

Полученные на диаграммах зависимости показали высокую достоверность вычисления, т. к. достоверность аппроксимации (*R²*) принимает значения от 0,978 до 0,991, а коэффициенты вариации вектора ошибок (*V_б*) принимают значения от 0,065 до 0,101, в зависимости от метода расчета. Эти показатели свидетельствуют о тесной зависимости опытных и рассчитанных значений несущей способности свай (допускаемых нагрузок на сваи).

Из анализа диаграммы (рисунок 3а) несущей способности свай из напрягающих бетонов и растворов по грунту, показывающей зависимость фактических значений (*F_u*) от расчетных значений (*F_d*) несущей способности, можно сделать выводы:

- по предлагаемой методике большинство точек расположены ниже диагонали, выделенной на диаграмме, то есть расчетная несущая способность свай (*F_d*) выше опытных значений (*F_u*), что с позиции надежности менее приемлемо, чем занижение, однако отклонение результатов расчета по предлагаемой методике от опытных значений оказалось минимальным по сравнению с другими методами расчета;
- по методике ТНПА и методу конечных элементов большинство точек расположены выше диагонали, выделенной на диаграмме, то есть расчетная несущая способность свай (*F_d*) ниже опытных значений (*F_u*).

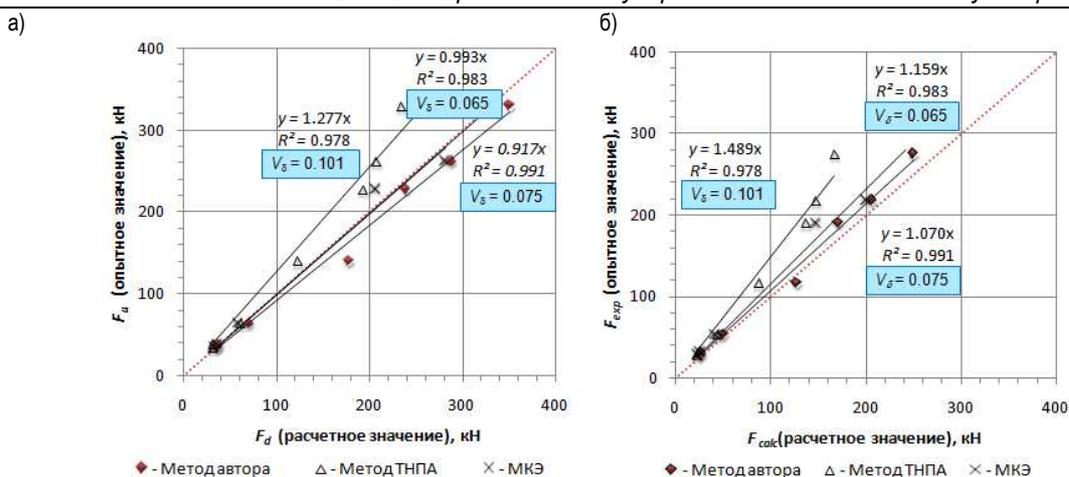


Рисунок 3 – Диаграммы сопоставления результатов определения несущей способности свай (а) и допускаемой нагрузки на сваи (б) из напрягающих бетонов и растворов

Несколько иная картина наблюдается при пересчете значений несущей способности в значения допускаемой нагрузки на сваю и построении соответствующей диаграммы (рисунок 3б), анализ которой показывает, что:

- по предлагаемой методике большинство точек расположены выше диагонали, выделенной на диаграмме, то есть расчетная допускаемая нагрузка свай (F_{calc}) не превышает опытной (F_{exp});
- по методике ТНПА и методу конечных элементов все точки расположены выше диагонали, выделенной на диаграмме, и выше точек, вычисленных по предлагаемой методике, то есть расчетная допускаемая нагрузка свай (F_{calc}) не превышает опытной (F_{exp}) и данные методы являются менее точными по сравнению с предлагаемым методом.

В целом анализ диаграмм показал, что вычисленные значения по предлагаемой методике более точно отражают опытное значение несущей способности свай (допускаемой нагрузки на сваи) из бетонов на НЦ, так как учитывает особенности работы бетонов на НЦ.

Заключение

Приведенные в методике расчета несущей способности буронабивных свай из бетонов на НЦ при действии вертикальной статической нагрузки зависимости позволяют определить:

- рекомендуемые границы расположения бетонов на НЦ в стволе свай;
- напряжения и деформации грунта по боковой поверхности и под нижним концом свай;
- повышение несущей способности сваи по боковой поверхности и под нижним концом сваи от применения бетонов на НЦ.

Сопоставительные расчеты несущей способности буронабивных свай из бетонов на НЦ по предлагаемой методике и методом конечных элементов показали хорошую сходимость с опытными данными по сравнению с табличным способом расчета по ТКП 45-5.01-254, так как учитывают применение бетонов на НЦ, а значит, и достоверно отражают опытные значения несущей способности буронабивных свай (допускаемой нагрузки на сваи) из бетонов на НЦ.

Список цитированных источников

1. Mandolini, A. Pile foundations: experimental investigations, analysis and design / A. Mandolini, G. Russo, C. Viggiani // The 39th Japan National Conference on Geotechnical Engineering. – Osaka, 2005. – P. 121–145.
2. Особенности применения свай в Восточной Сибири / Ю. Н. Козаков [и др.] – Красноярск : Стройиздат, 1992. – 268 с.
3. Sheikh, S. A. Expansive cement concrete for drilled shafts / S. A. Sheikh, Y. Fu, M. W. O'Neill // ACI material journal. – 1993. – V. 91. – P. 237–245.
4. Невейков, А. Н. Экспериментальные исследования несущей способности буронабивных свай из напрягающего бетона / А. Н. Невейков // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. – Ровно : РДУ, 2012. – Випуск 23. – С. 598–607.
5. Аль Масри, А. С. Несущая способность буронабивных свай в песчаных грунтах : дис. ... канд. техн. наук / А. С. Аль Масри. – Минск, 1998. – 210 с.
6. Лапшин, Ф. К. Расчет свай по предельным состояниям : моногр. / Ф. К. Лапшин. – Саратов : Изд. Саратовского университета, 1979. – 152 с.

7. Расчет напряженно-деформированного состояния ствола буронабивной сваи из напрягающего бетона / П. С. Пошта [и др.] // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym : praca zbiorowa – Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej, 2009. – P. 250–258.
8. Невейков, А. Н. Взаимодействие буронабивных свай из обычных и напрягающих бетонов с грунтовым массивом / А. Н. Невейков, П. С. Пошта // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке научных кадров : сб. тр. XVII науч.-метод. семинара – Гродно : ГГУ, 2010. – С. 202–207.
9. Невейков, А. Н. Применение расширяющихся бетонов и растворов для опытного устройства буронабивных и буроналивных свай в Республике Беларусь / А. Н. Невейков // Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте : сборник статей II Международной конференции. – Брест : Издательство БрГТУ, 2017. – С. 126–131.

References

1. Mandolini, A. Pile foundations: experimental investigations, analysis and design / A. Mandolini, G. Russo, C. Viggiani // The 39th Japan National Conference on Geotechnical Engineering. – Osaka, 2005. – P. 121–145.
2. Особенности применения свай в Восточной Сибири / Yu. N. Kozakov [и др.] – Krasnoyarsk : Strojizdat, 1992. – 268 s.
3. Sheikh, S. A. Expansive cement concrete for drilled shafts / S. A. Sheikh, Y. Fu, M. W. O'Neill // ACI material journal. – 1993. – V. 91. – P. 237–245.
4. Nevejkov, A. N. Eksperimental'nye issledovaniya nesushchej sposobnosti buronabivnyh svaj iz napryagayushchego betona / A. N. Nevejkov // Resursoekonomni materialy, konstrukcii, budivli ta sporudi : zb. nauk. pr. – Rovno : RDU, 2012. – Vipusk 23. – S. 598–607.
5. Al' Masri, A. S. Nesushchaya sposobnost' buroin'ekcionnyh svaj v peschanyh gruntah : dis. ... kand. tekhn. nauk / A. S. Al' Masri. – Minsk, 1998. – 210 s.
6. Lapshin, F. K. Raschet svaj po predel'nyh sostoyaniyam : monogr. / F. K. Lapshin. – Saratov : lzd. Saratovskogo universiteta, 1979. – 152 s.
7. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya stvola buronabivnoj svai iz napryagayushchego betona / P. S. Pojta [i dr.] // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym : praca zbiorowa – Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej, 2009. – P. 250–258.
8. Nevejkov, A. N. Vzaimodejstvie buronabivnyh svaj iz obychnykh i napryagayushchih betonov s gruntovym massivom / A. N. Nevejkov, P. S. Pojta // Perspektivy razvitiya novykh tekhnologij v stroitel'stve i podgotovke nauchnyh kadrov : sb. tr. XVII nauchn.-metod. seminar – Grodno : GGU, 2010. – S. 202–207.
9. Nevejkov, A. N. Primenenie rasshiryayushchihsy betonov i rastvorov dlya opytnogo ustrojstva buronabivnyh i buroin'ekcionnyh svaj v Respublike Belarus' / A. N. Nevejkov // Aktual'nye problemy issledovaniya materialov, konstrukcij, tekhnologij i organizacii stroitel'stva v transgranichnom aspekte : sbornik statej II Mezhdunarodnoj konferencii. – Brest : lzdatel'stvo BrGTU, 2017. – S. 126–131.

Материал поступил в редакцию 11.01.2020