

Логутин Валерий Васильевич
Logutin Valeriy Vasilyevich
Ростовский государственный строительный университет Rostov State
University of Civil Engineering
Профессор/Professor

Исаев Борис Никитович
Isaev Boris Nikitovich
НИИ механики и прикладной математики ЮФУ
Research Institute of mechanics and applied mathematics SFU
Старший научный сотрудник
Senior research assistant

Бадеев Сергей Юрьевич
Badeev Sergei Yurevich
Научно-исследовательское производственное предприятие «ИНТРОФЭК»
Research manufacturing enterprise “INTROFEK”
Директор/Director

Кузнецов Максим Викторович
Kuznetsov Maxim Victorovich
Ростовский государственный строительный университет Rostov State
University of Civil Engineering
Ассистент/Assistant
05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения
E-Mail: maxk81@mail.ru

Зависимость деформаций основания от параметров его закрепления регулируемыми пространственными структурами

Deformation dependence on its fixing parameters regulated with spatial structures

Аннотация: В статье описывается технология закрепления оснований регулируемыми пространственными структурами из цементогрунта. В результате расчетов с использованием конечно-элементного комплекса изучена зависимость деформаций закрепленного основания от параметров структурных элементов. С целью оптимизации проектного решения методами планирования экспериментов получены аналитические формулы для определения осадки закрепленного основания при различных параметрах пространственных структур.

The Abstract: The article describes the techniques of footing fixing regulated with spatial structures of cementing soil. Calculations using finite element complex result in deformation dependence of fixed footing on structural elements parameters. Aiming at building design optimization the analytical formulas for settling parameters of fixed footing under different parameters of spatial structures are obtained here.

Ключевые слова: Основания, фундаменты, закрепление грунтов, армоэлементы, деформация основания.

Keywords: Footings, Foundations, Soil fixing, Reinforced elements, Footing deformation.

На основе многолетнего опыта проектирования и производства работ по закреплению структурно-неустойчивых и слабых предложена технология формирования регулируемых пространственных структур, повышающая надежность армирования таких грунтов в основании зданий и сооружений. На изобретение получен патент [5]. Способ осуществляется в следующей последовательности.

Сначала бурится скважина. На её стенке выполняется продольный концентратор напряжений. Запирается верхняя часть скважины и в массиве образуется вертикальная плоскость разрыва, которая заполняется под давлением вспененным цементно-грунтовым раствором. При этом образуется армоэлемент. Затем производят выдержку твердеющего материала от 7-ми до 24 часов, зачищают скважину в этом возрасте от твердеющего материала, выполняют разворот резца под заданным углом и, создавая новый разрыв, формируют структурный элемент требуемой формы и размеров. Выдержку твердеющего материала производят для того, чтобы раствор схватился, но имел в этом возрасте малую прочность, позволяющую с малыми затратами производить зачистку скважины при выбуривании материала шнеком и нарезку концентратора после разворота резца.

На рис. 1 в качестве примера показаны структурные элементы, создаваемые из армоэлементов под углами 90° и 120° .

Разрывы и армоэлементы могут быть размещены под любыми углами в диапазоне от 0 до 360° в зависимости от поставленных задач, формы фундамента и требуемой степени армирования.

Из созданных структурных элементов komponуют в основании фундаментов зданий и сооружений пространственные структуры путем объединения их в плане и по высоте.

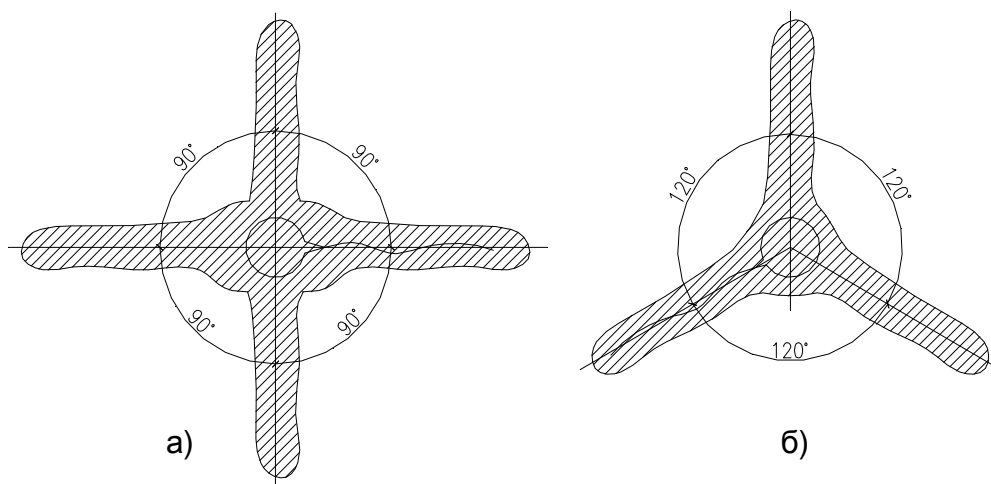


Рис. 1. Структурные элементы, создаваемые из армоэлементов под углами а) - 90° и б) - 120°

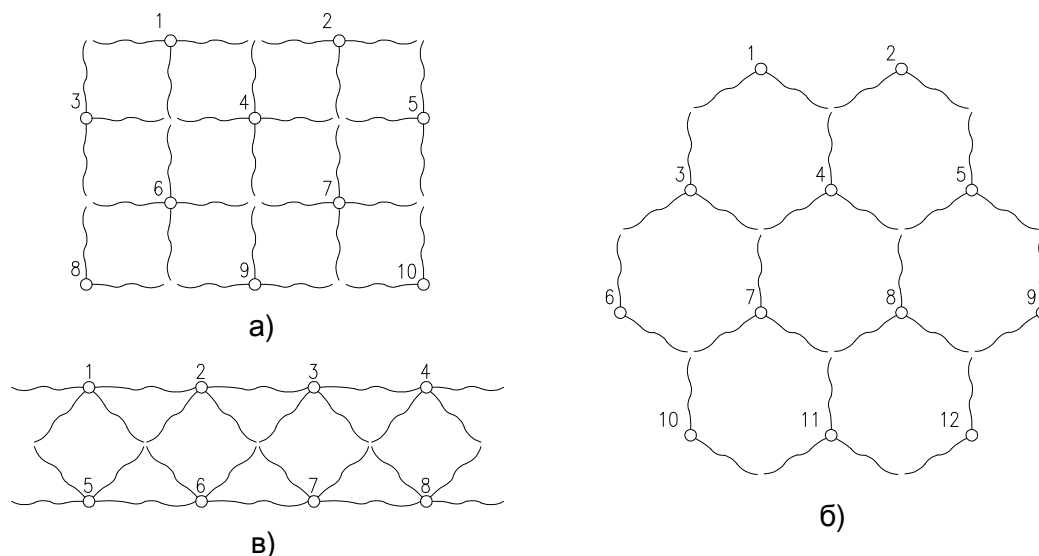


Рис. 2. Пространственные структуры а) - прямоугольной, б) - шестигранной и в) - треугольной формы

На рис. 2 показаны (в виде примера) пространственные структуры прямоугольной, шестигранной и треугольной формы, которые могут быть созданы из структурных элементов в основании зданий и сооружений. Изменяя длину, толщину, высоту и прочностные показатели твердеющего материала армоэлементов, способ позволяет в широком диапазоне менять степень армирования грунтового массива и его геотехнические характеристики.

Проектирование основания, армированного регулируемыми структурными элементами, связано с определением численных значений параметров закрепления, удовлетворяющих требованиям расчетов по предельным состояниям. В то же время проектный набор параметров должен быть оптимальным, т.е. обеспечивать экстремум целевой функции. Для выбора оптимального проектного решения пространственных структур для конкретного здания в заданных инженерно-геологических условиях необходим большой объем численных исследований - экспериментов.

Методы планирования эксперимента и обработки его результатов [2], разработанные на основе теории вероятности и математической статистики, позволяют существенно сократить число необходимых для проведения опытов. Знание и использование этих методов делает работу экспериментатора более целенаправленной и организованной, существенно повышает как производительность его труда, так и надежность получаемых им результатов.

Целью эксперимента может быть либо определение функции отклика, либо поиск такого сочетания уровней управляемых факторов, при котором достигается оптимальное (экстремальное – минимальное или максимальное) значение функции отклика.

В качестве отклика было принято отношение осадки основания, закрепленного структурными элементами к осадке естественного основания, т.е. S_{ae}/S . Значение S определялось по СНиП 2.02.01-83*[4], а S_{ae} - в результате численных экспериментов с использованием расчетного комплекса «ANSYS». Входными параметрами явились факторы, оказывающие существенное воздействие на объект исследования. В нашем случае это:

- 1) Q - содержание цемента в цементно-грунтовом камне, %
- 2) b_{ae} - размер ячейки структурных армоэлементов, м
- 3) δ_{ae} - толщина армоэлементов, м

4) h_{ae}/H - относительная глубина усиления (h_{ae} - высота армоэлементов, H – глубина сжимаемой толщи)

5) d_{ae} - вынос армоэлементов за грань фундамента, м.

Для определения аналитической зависимости отношения S_{ae}/S от указанных параметров усиления в первой серии численных экспериментов основание принималось однородным со следующими физико-механическими характеристиками: модуль деформации $E=9\text{МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu=0.35$, $g=0$. Плитный фундамент шириной $b=12\text{м}$ и длиной $l=24\text{м}$ толщиной 1м имел характеристики бетона: модуль деформации $E=26700\text{МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu=0.1$.

При выборе факторов учитывались требования, предъявляемые к ним: управляемость и однозначность, а также к их совокупности – совместимость и независимость друг от друга. При предварительном анализе влияния каждого фактора в отдельности на объект исследования, было установлено, что зависимости вида $S_{ae}/S=f(Q)$, $S_{ae}/S=f(b_{ae})$, $S_{ae}/S=f(\delta_{ae})$, $S_{ae}/S=f(h_{ae}/H)$, $S_{ae}/S=f(d_{ae})$ нелинейные (рис. 3-7). Поэтому за основной вид функции отклика для всех параметров оптимизации был принят полином второго порядка.

При планировании применялся центральный композиционный план второго порядка полного факторного эксперимента. Достоверность принятого в работе подхода обеспечивалась 5% уровнем значимости. Обработка результатов эксперимента производилась по формулам и методике, представленной в [1].

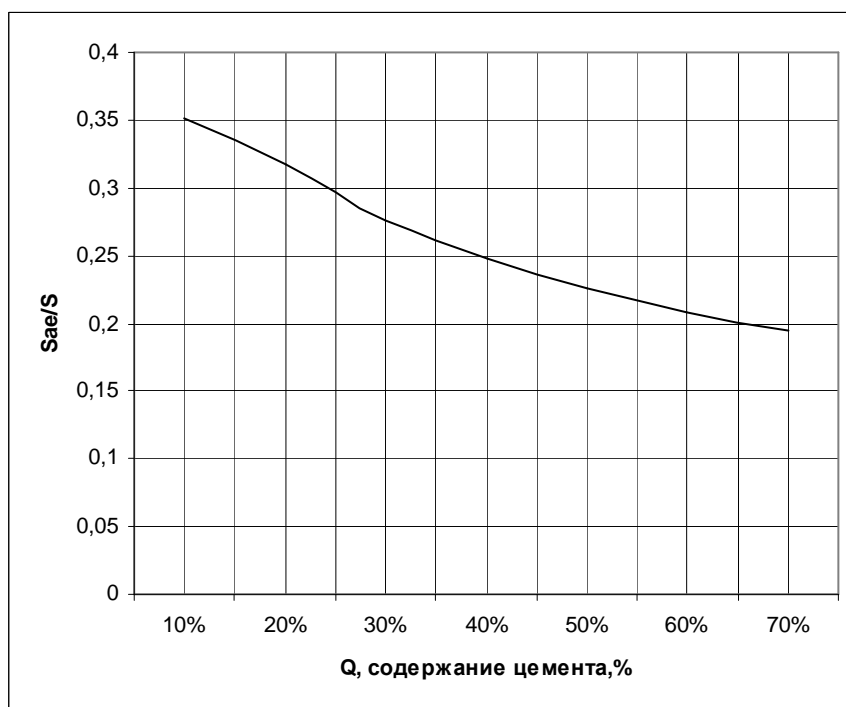


Рис. 3. Изменение деформации основания от содержания цемента в цементно-грунтовом камне

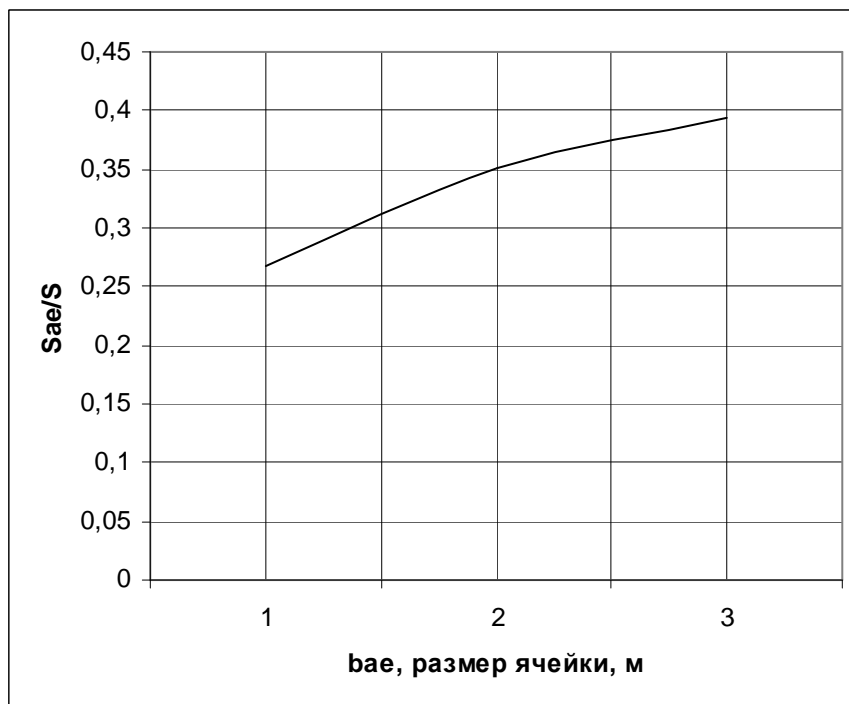


Рис. 4. Изменение деформации основания от размера ячейки структурного армоэлемента

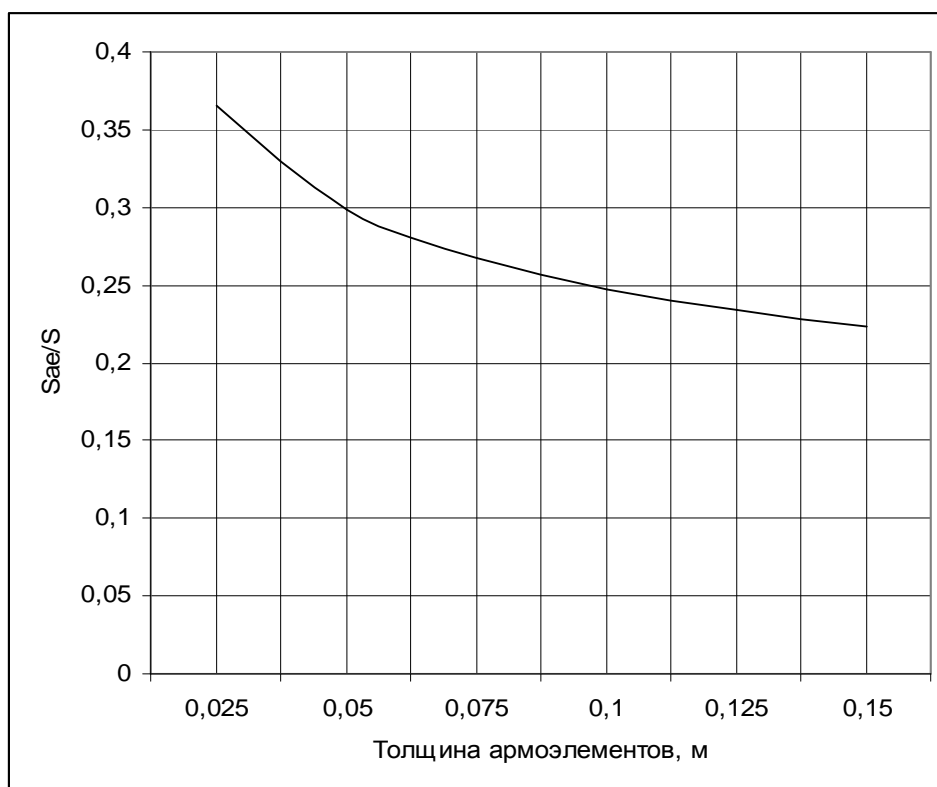


Рис. 5. Изменение деформации основания от толщины армоэлементов

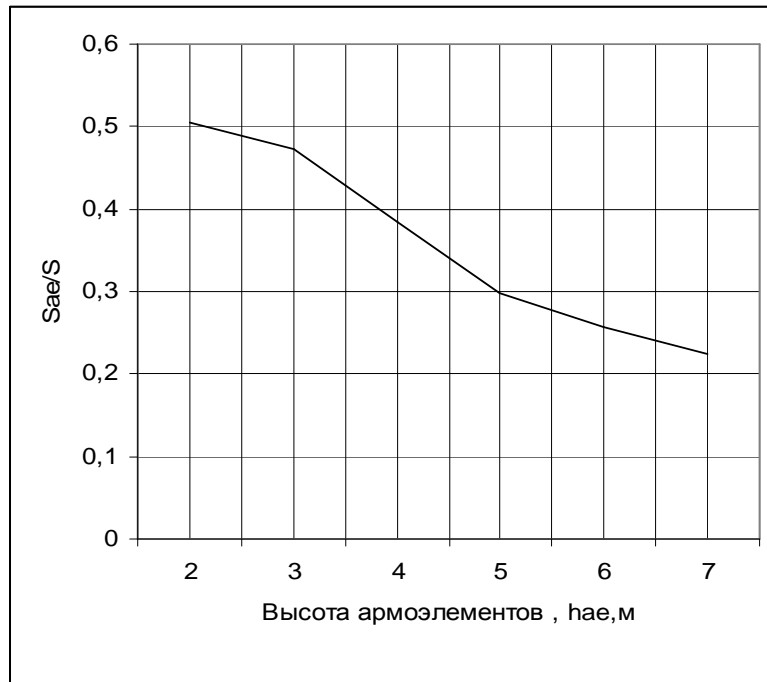


Рис. 6. Изменение деформации основания от высоты армоэлементов

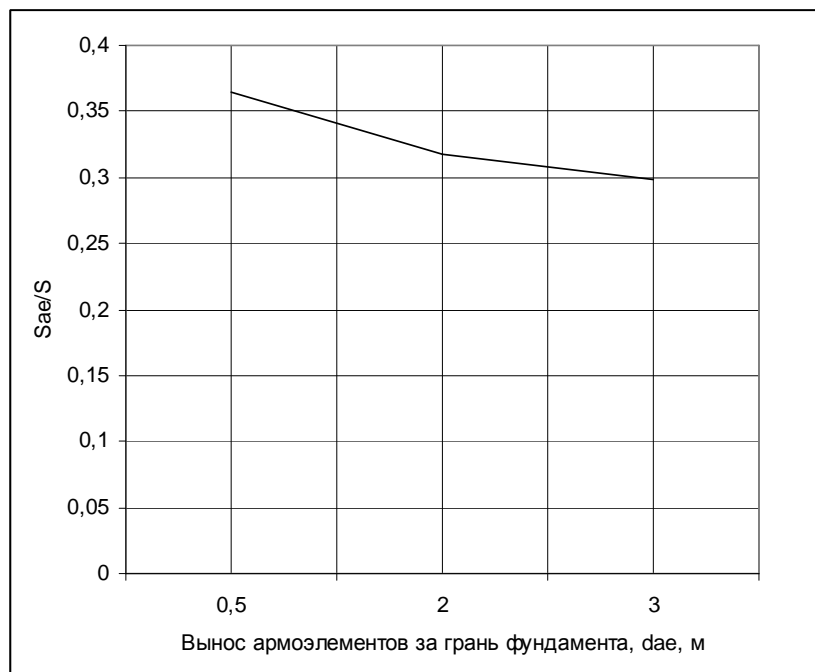


Рис. 7. Изменение деформации основания от выноса армоэлементов за грань фундамента

Уравнение регрессии, получаемое на основании результатов эксперимента, имеет вид:

$$\frac{S_{ae}}{S}(x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=u=1 \\ i \neq u}}^k b_{iu} x_i x_u + \dots \quad (1)$$

где b_0, b_i, b_{ii}, b_{iu} – коэффициенты регрессии;

$x_1 \dots x_k = Q, b_{ae}, \delta_{ae}, h_{ae}/H, d_{ae}$ – факторы, определяющие исследуемый параметр.

На основании опыта проектирования армирования грунтов через направленный разрыв были выбраны основной уровень и интервал варьирования факторов, представленные в таблице.

Переход к кодированным значениям осуществлялся по формуле:

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{\lambda_i}, \quad (2)$$

где x_i - кодированное значение фактора;

X_i - текущее натуральное значение i -го фактора;

X_i^0 - основной уровень i -го фактора;

λ_i - шаг варьирования.

Таблица

Интервалы и уровни варьирования факторов

Условия	Формулы	Факторы									
		$X_1(Q, \%)$		$X_2(b_{ae}, M)$		$X_3(\delta_{ae}, M)$		$X_4(h_{ae}/H)$		$X_5(d_{ae}, M)$	
		Физ. знач	код	Физ. знач	код	Физ. знач	код	Физ. знач	код	Физ. знач	код
Основной уровень	$X_i^0 = \frac{X_i^e + X_i^h}{2}$	40	0	2	0	0,075	0	0,57	0	1.75	0
Шаг варьирования	$\lambda_i = \frac{X_i^e - X_i^h}{2}$	30		1		0,025		0,43		1.25	
Верхний уровень	X_i^e	70	+1	3	+1	0,1	+1	1	+1	3	+1
Нижний уровень	X_i^h	10	-1	1	-1	0,05	-1	0,14	-1	0.5	-1

С целью сокращения числа опытов был использован композиционный или последовательный план, разработанный Боксом и Уилсоном [1]. Для определения уравнения $S_{ae}/S = f(x_1 \dots x_k)$ факторы $x_1 \dots x_k$ должны варьироваться не менее чем на трех уровнях.

Поскольку эксперимент проводился с использованием МКЭ, то опыты проводились с однократной реализацией из-за отсутствия влияния случайных факторов на результат.

Для сравнения с результатами счета на программном комплексе «ANSYS» и по СНиП 2.02.01-83*[4] была определена осадка основания плитного фундамента по расчетной схеме линейно деформируемого полупространства по методу послойного суммирования с условным ограничением глубины сжимаемой толщи.

После математической обработки результатов вычислений была получена окончательная зависимость осадки основания плитного фундамента от количества цемента в цементно-грунтовом элементе, размера ячейки элементов, их толщины, относительной глубины усиления и выноса элементов за грань фундамента:

$$\begin{aligned}
 S_{ae}/S = & (1.11 - 0.00163 Q - 0.185 b_{ae} + 3.446 \delta_{ae} - 1.009 h_{ae}/H - \\
 & - 0.121 d_{ae} + 0.0002 Q b_{ae} - 0.0043 Q \delta_{ae} - 0.0034 Q h_{ae}/H - 5.94 \times 10^{-4} Q d_{ae} + \\
 & + 0.0714 b_{ae} h_{ae}/H - 2.087 \delta_{ae} h_{ae}/H + 0.0518 d_{ae} h_{ae}/H - 0.0012 Q b_{ae} h_{ae}/H + \\
 & + 0.028 Q \delta_{ae} h_{ae}/H + 7.238 \times 10^{-4} Q d_{ae} h_{ae}/H + 1.92 \times 10^{-5} Q^2 + 0.053 b_{ae}^2 - \\
 & - 24.71 \delta_{ae}^2 + 0.321 (h_{ae}/H)^2 + 0.015 d_{ae}^2) k_1 k_2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

Сравнение результатов определения значений S_{ae}/S , вычисленных по формуле (3), с полученными при использовании программного комплекса «ANSYS» показало их достаточную сходимость для однородного основания с модулем $E=9$ МПа. В то же время эти поверочные расчеты выявили необходимость учета фактического модуля деформации грунта E . Его влияние предлагается учесть путем введения коэффициента k_1 . Анализ результатов численных экспериментов при различных модулях деформации грунта показал, что его значение можно приближенно определить по следующей формуле:

$$k_1 = 1.613 + 0.064 \cdot b_{ae} + 2.131 \cdot \delta_{ae} + 0.08 \cdot \frac{h_{ae}}{H} - 1.972 \cdot \lg E + 1.161 \cdot \lg^2 E - 0.899 \cdot b_{ae} \cdot \delta_{ae} \quad (4)$$

При расчете неоднородных многослойных оснований, для определения коэффициента k_1 следует пользоваться осредненным значением модуля \bar{E}_0 по формуле 11 приложения 2 СНиП [4].

$$\bar{E}_0 = \frac{\sum h_i \sigma_{zi}}{\sum (H_i \sigma_{zi} / E_i)} \quad (5)$$

где h_i – толщина i -го слоя грунта, см;

E_i – модуль деформации i -го слоя, МПа;

σ_{zi} – среднее значение вертикальных напряжений, МПа, для данного слоя на вертикальной оси под центром подошвы конструкции, принимается, что опорная площадь равномерно загружена и собственный вес не учитывается.

Для того, чтобы учесть расположение слоев в многослойном основании, надо полученное значение деформации основания, с осредненным значением модуля \bar{E}_0 , умножить на коэффициент k_2 , определяемый формулой:

$$k_2 = \frac{\bar{E}_0}{H} \sum \frac{h_i}{E_i}, \quad (6)$$

где H – глубина сжимаемой толщи;

E_i – модуль деформации слоя.

По формуле (3) можно вычислить осадку основания усиленного элементами повышенной жесткости при различных значениях параметров регулируемых пространственных структур - содержания цемента, размера ячейки, толщины и относительной глубины элементов, выноса за грань фундамента без использования конечно-элементных расчетных комплексов. Эта формула позволила также разработать довольно простую методику определения сочетания параметров закрепления.

В разработанной авторами программе «Армомассив» при варьировании реально возможных значений параметров усиления для каждого сочетания по формуле (3) вычисляется осадка закрепленного основания. Для сочетаний проектных параметров, удовлетворяющих

конструктивным ограничениям и расчетам основания по деформациям, вычисляется целевая функция – стоимость усиления. Оптимальным является сочетание параметров, удовлетворяющих всем ограничениям, с минимальной стоимостью закрепления. Для оптимального варианта рекомендуется уточнить значения осадки основания с помощью расчетного комплекса «ANSYS»

ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
2. Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Конспект лекций (отдельные главы из учебника для вузов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004.- 257с.
3. Основания, фундаменты и подземные сооружения / М.И. Горбунов- Посадов, В.А. Ильичев, В.И. Крутов, и др.; Под общ. Ред. Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. М.: Стройиздат, 1985. 480 с., ил.
4. СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений. – М.: Минстрой России, 2002 – 63с.
5. Патент на изобретение №2459037 Способ создания в грунтовом массиве пространственных структур из твердеющего материала / Б.Н. Исаев, С.Ю. Бадеев, М.В. Кузнецов - Заявка №2010141745; Заявл. 11.10.2010 Опубл. 20.08.2012 Бюл. №23.