

УДК 624.15

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОСНОВАНИЙ КРЕСТООБРАЗНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

Глушков А.В.

ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», Йошкар-Ола,
e-mail: 256289@list.ru

Представлены результаты численных исследований анализа напряженно-деформированного состояния фундаментов с крестообразной формой подошвы, влияния изменения прочностных и деформационных характеристик грунта, мощности сжимаемого слоя. В современных строительных нормах и правилах не рассматривается расчет фундаментов крестообразной формы. В основу методики положены полевые испытания грунтового основания статическими нагрузками, которые позволяют правильно оценить совместную работу отдельностоящих фундаментов с различной формой подошвы и массива грунта. Установлено качественное и количественное влияние изменения характеристик грунта на распределение напряжений и перемещений в активной зоне. Проведенный регрессионный анализ с использованием многофакторных математических моделей позволил разработать инженерный метод расчета осадок фундамента в связных и несвязных грунтах. Статья предназначена для специалистов в области промышленного и гражданского строительства и инженеров-геотехников.

Ключевые слова: крестообразный фундамент, прочностные характеристики грунта, деформационные свойства, анализ напряженно-деформированного состояния основания

ELASTOPLASTIC ANALYSIS OF THE CRUCIFORM FOUNDATIONS

Glushkov A.V.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: 256289@list.ru

This article reviews the numerical investigation of the stress-strain state of the foundation with the cruciform bed, the influence of strength and deformative properties variations, the variations of boundary layer thickness. Normative documents do not allow to estimate the stress-strain state of the foundations soil basis with the complex shape of the bed. Static soil test used as a basis method to estimate the interaction of variously shaped drawings and the subsoil bed. Article presents the qualitative and quantitative stress-strain state changes of properties variations under the cruciform drawings. The accomplished regression analysis using the multiple-factor mathematical models let develop the engineering approach of cruciform footing settlement computation for cohesive and non-cohesive soil basement. This article seems to be interesting to those who work in the field of building construction and geotechnics engineering.

Keywords: cruciform footing, strength properties, deformation behavior, soil basement stress-strain analysis

Фундаменты являются одной из ответственных конструкций здания. Так стоимость устройства фундаментов составляет 10–15% стоимости сооружения, а в сложных инженерно-геологических условиях достигает 20%. Основной задачей, стоящей перед геотехниками, является использование более эффективных фундаментов, к которым относятся фундаменты с крестообразной формой подошвы [7, 11]. Использование крестообразных фундаментов дает возможность за счет большего периметра краевой зоны, приводящего к увеличению сопротивлению грунта сдвигу, снизить материалоемкость и уменьшить осадки фундамента [4]. Это обусловлено также включением в работу большего объема грунта в основании, наличием «арочного эффекта» между выступами фундамента [5]. Вместе с тем, в нормативных документах отсутствует методика расчета фундаментов со сложным очертанием опорной плиты.

Методы расчета оснований и фундаментов постоянно совершенствуются в направлении использования упругопластических

моделей с учетом образования зон пластических деформаций в основании [3, 8, 9].

Целью исследования является выявление закономерностей и особенностей пространственного взаимодействия фундамента с крестообразной формой подошвы с основанием, исследование влияния прочностных (C , φ) и деформационных (E , ν) характеристик грунта, мощности сжимаемого слоя (H/b) на напряженно-деформированное состояние в активной зоне во всем интервале приложенных нагрузок, разработка инженерного метода прогноза осадок.

Одновременный учет прочностных и деформационных свойств грунта в расчетах напряженно-деформированного состояния основания крестообразного фундамента был осуществлен в решении пространственной упругопластической задачи методом конечных элементов с использованием программного комплекса PLAXIS.

Грунт в допредельном состоянии представляет собой сплошную линейно деформируемую среду, переходящую с последующим нагружением в предельное

(пластическое) состояние в соответствии с критерием текучести (прочности) Мора-Кулона. Расчет выполняется с использованием шаговой процедуры приложения нагрузки. Учет собственного веса грунта проводился в виде начальных напряжений $\sigma_z = \gamma h$; $\sigma_x = \sigma_y = \xi \gamma h$; $\tau = 0$, деформированное состояние основания определялось только от внешней нагрузки на фундамент. Нагрузка задавалась равномерно распределенной по площади $S = 4 \text{ м}^2$. По контакту подошвы фундамента с основанием принято условие полного прилипания. Расчетная область основания принималась размером $10,0 \times 10,0 \times 15,0 \text{ м}$.

Выполненные расчеты с учетом собственного веса грунта указывают на значительное влияние прочностных характеристик грунта (c и ϕ) на напряженно-деформированное состояние активной зоны крестообразного фундамента.

На рис. 1 показаны зависимости $S = f(P)$ и $S = f(C)$ для крестообразного фундамента при различных значениях удельного сцепления C для связного основания (глина мягкопластичная $c = 18 \text{ кН/м}^3$; $\phi = 18^\circ$; $E = 15 \text{ МПа}$). Из графиков видно, что уменьшение величины C ведет к значительному росту осадки крестообразного фундамента.

Анализ изменения вертикальных перемещений U_y в основании свидетельствует, что изменение C от 15 до 30 кПа приводит к уменьшению их максимальных значений в 1,89 раза, вытянутых вдоль вертикальной оси. Установлено, что с увеличением C от 15 до 30 кПа вертикальные перемещения на глубине $1,0b$ снижаются в 1,8 раза, ширина зоны деформации увеличивается в 1,6 раза.

Изменение C от 15 до 30 кПа при $P = 400 \text{ кПа}$ приводит к уменьшению глубины распространения зон пластических деформаций в 1,88 раза и ширины распределения пластических зон в 1,38 раза.

На рис. 2 приведены результаты зависимости $S = f(P)$ крестообразного фундамента при различных значениях ϕ для связного грунта. Так, при $P = 350 \text{ кПа}$ осадка крестообразного фундамента соответственно составила 89,2 мм ($\phi = 10^\circ$); 48,7 мм ($\phi = 15^\circ$); 35,1 мм ($\phi = 20^\circ$); 28,1 мм ($\phi = 25^\circ$); 24,6 мм ($\phi = 30^\circ$); 21,7 мм ($\phi = 40^\circ$). Анализ зависимости показал, что в диапазоне ϕ от 25° до 40° графики осадок от давления $S = f(P)$ носят близкий к линейному характер.

Анализ распределения зон предельного равновесия показал, что в связном основании возрастание ϕ от 15° до 30° при $P = 400 \text{ кПа}$ ведет к сокращению глубины области их распространения в 1,87 раза, в несвязном основании при росте ϕ от 27° до 34° при $P = 200 \text{ кПа}$ соответствующее уменьшение глубины составляет 1,22 раза. Исследованиями установлено, что при $P = 400 \text{ кПа}$ в связном грунте с ростом значения ϕ от 15° до 30° происходит увеличение высоты упругого ядра под центром фундамента от $h = 0,15b$ до $h = 0,55b$. Для несвязного грунта при $P = 200 \text{ кПа}$ высота упругого ядра, примыкающего к плоскости подошвы фундамента и раздвигающего грунт в стороны, соответственно составляет $h = 0,14b$ ($\phi = 27^\circ$) и $h = 0,53b$ ($\phi = 34^\circ$).

Исследовалось влияние изменения модуля деформации E на напряженно-деформированное состояние основания крестообразного фундамента для связного и несвязного грунта. На рис. 3 приведены результаты исследования влияния модуля деформации E связного грунта (глина мягкопластичная $c = 20 \text{ кПа}$, $\phi = 18^\circ$) на осадку крестообразного фундамента S при различных давлениях P . Как видно из графиков, с ростом модуля деформации E в основании происходит плавное уменьшение значений осадки S . Все графики $S = f(P)$ при значениях давления более $P = 200 \text{ кПа}$ имеют нелинейный характер.

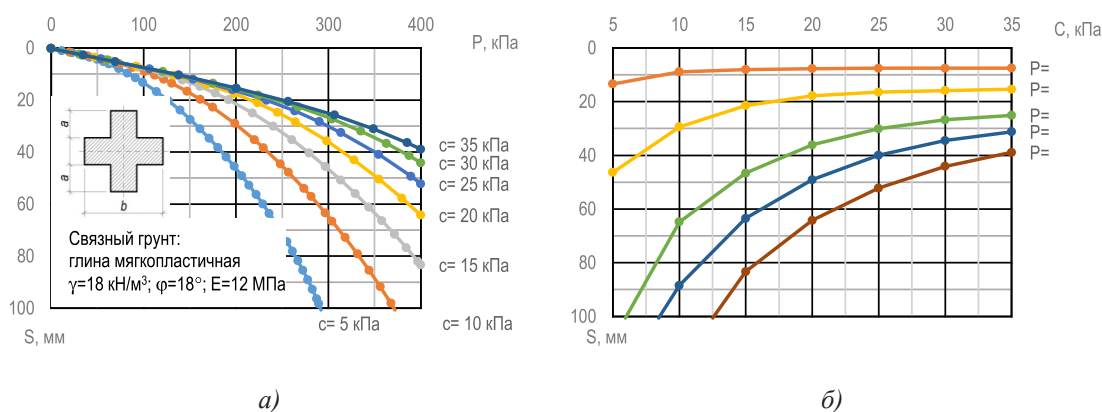


Рис. 1. Влияние удельного сцепления C на осадки крестообразного фундамента (связный грунт)

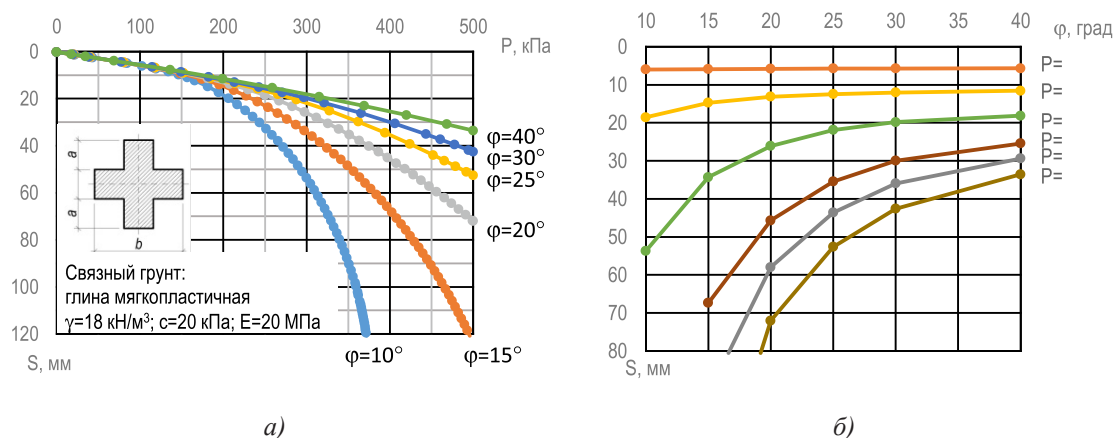


Рис. 2. Влияние угла внутреннего трения ϕ на осадки крестообразного фундамента (связный грунт)

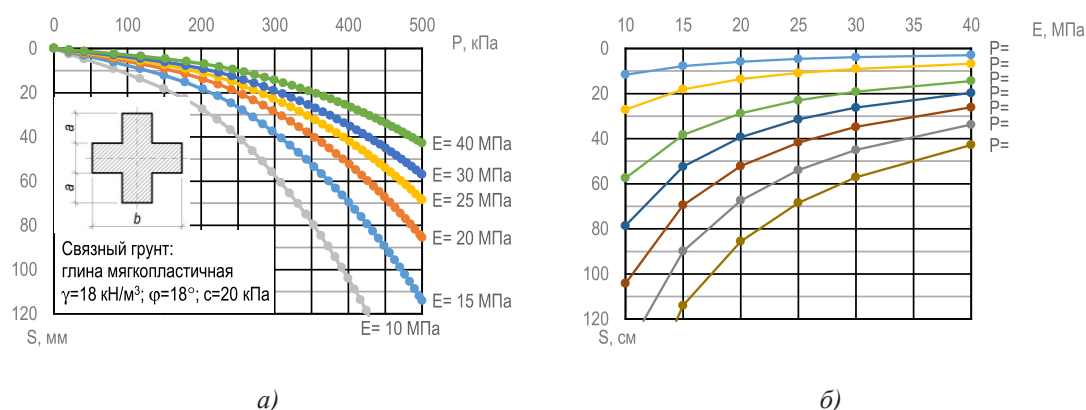


Рис. 3. Влияние модуля деформации E на осадки крестообразного фундамента (связный грунт)

Установлено, что изменение E от 15 до 30 МПа приводит к уменьшению максимальных вертикальных перемещений U_y в 1,99 раза в связном грунте при $P = 500 \text{ кПа}$. Так, возрастание E от 20 до 40 МПа в несвязном грунте уменьшает соответствующее значение осадки в 2,0 раза при $P = 400 \text{ кПа}$.

Проведена оценка изменения значений коэффициента Пуассона (от $\nu = 0,20$ до $0,45$) для связного типа грунта (глина мягкопластичная $E = 12 \text{ МПа}$; $c = 20 \text{ кПа}$, $\phi = 18^\circ$) (рис. 4). С ростом нагрузки происходит плавный переход графиков $S = f(P)$ из упругой стадии к нелинейному характеру зависимости при давлении P более 150 кПа .

Возрастание значения ν от $0,20$ до $0,35$ приводит к уменьшению максимальных значений вертикальных перемещений U_y в активной зоне в 1,85 раза при $P = 400 \text{ кПа}$. Максимальные горизонтальные перемещения U_x грунта с основания уменьшаются соответственно в 1,41 раза.

Изменение деформационной характеристики коэффициента Пуассона ν не оказывает существенного влияния на характер распределения и значения максимумов изолиний вертикальных σ_y и касательных τ_{xy} напряжений в основании крестообразных фундаментов.

В ходе исследований установлено, что увеличение значения ν от $0,33$ до $0,45$ приводит к уменьшению образования и развитию зон предельного равновесия в основании и появлению у подошвы фундамента клиновидной области упругих деформаций. С ростом значения ν от $0,33$ до $0,45$ при $P = 400 \text{ кПа}$ ширина упругой области увеличивается в 1,54 раза. При значении $\nu = 0,20$ при $P = 400 \text{ кПа}$ с глубины $1,8 b$ под центром фундамента появляется область упругих деформаций до глубины $4,4 b$, ширина области составляет $2,76 b$. Аналогичный характер распределения зон пластических деформаций в основании наблюдается при значении $\nu < 0,20$.

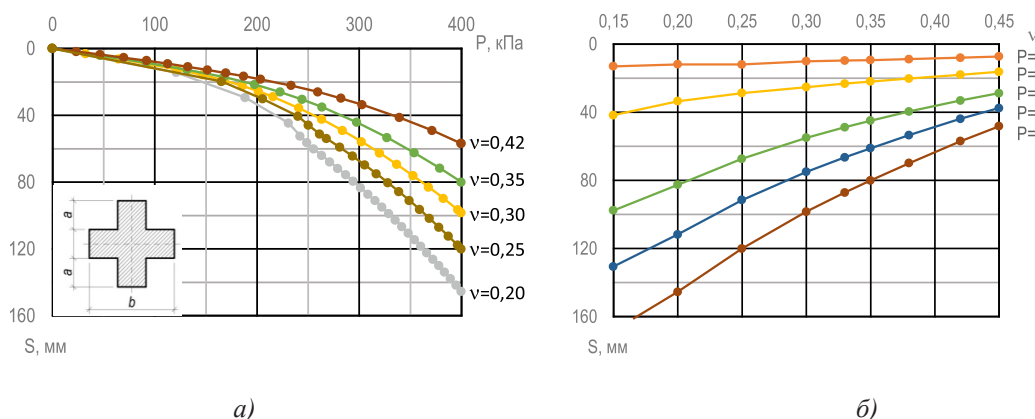


Рис. 4. Влияние коэффициента Пуассона ν на осадки крестообразного фундамента (связный грунт)

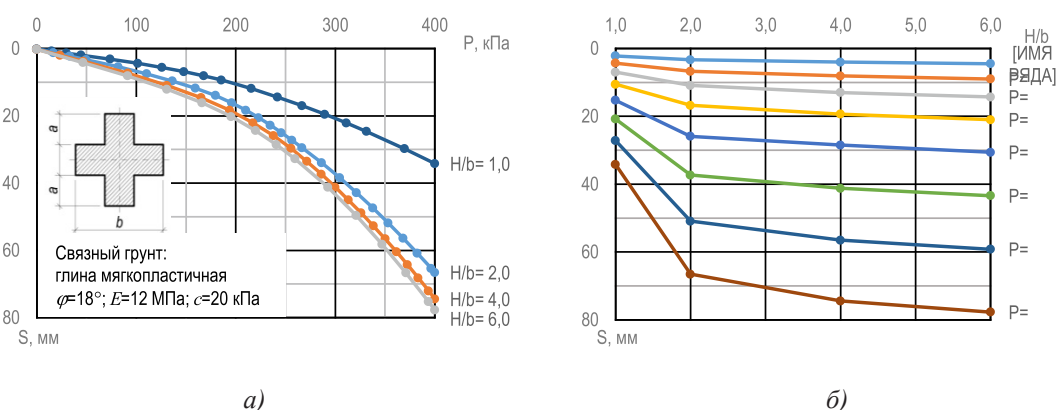


Рис. 5. Зависимости $S = f(P)$ и $S = f(H/b)$ для крестообразного фундамента

В результате анализа графиков зависимости $S = f(P)$ выявлено, что увеличение мощности сжимаемого слоя H/b приводит к росту осадки S крестообразного фундамента. Так, при $P = 400$ кПа в связном грунте значение осадки соответственно составляет: $S = 3,42$ см ($H/b = 1,0$); $S = 6,65$ см ($H/b = 2,0$); $S = 7,45$ см ($H/b = 4,0$); $S = 7,77$ см ($H/b = 6,0$) (рис. 5). Из графиков видно, что наиболее существенное изменение осадки фундамента происходит при изменении H/b до 4,0.

Для широкого использования в проектной в практике решений нелинейных задач механики грунтов представляется возможным выявить влияние факторов (φ ; c ; E ; ν ; p ; H/b ; K) на осадку S крестообразного фундамента. В качестве математической модели, связывающей величину осадки крестообразного фундамента с исходными параметрами, принята многофакторная степенная зависимость.

$$S = \frac{0,12 \cdot p^{1,90} \cdot (H/b)^{0,37} \cdot K^{1,05}}{E^{0,89} \cdot c^{0,66} \cdot \varphi^{1,49} \cdot \nu^{0,71}}, \quad (1)$$

(связный грунт)

$$S = \frac{2441,06 \cdot p^{1,60} \cdot (H/b)^{0,49} \cdot K^{0,82}}{E^{1,55} \cdot \varphi^{3,31}} \quad (2)$$

(несвязный грунт)

где p – давление по подошве фундамента; K – масштабный коэффициент.

Сопоставление полученных нелинейных решений с данными статических испытаний крестообразного фундамента [4] указывает на их хорошее соответствие и возможность проектирования эффективных фундаментов со сложной формой подошвы, исходя из условия достижения предельно допустимых осадок.

Список литературы

1. Глушков А.В. Напряженно-деформированное состояние оснований фундаментов сложной формы подошвы / А.В. Глушков, В.Е. Глушков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3.
2. Глушков В.Е. Оптимизация формы подошвы фундаментов / В.Е. Глушков, А.В. Глушков // Материалы V международной конференции «Городские агломерации на оползневых территориях». – Волгоград, ВолгГАСУ, 2010. – С. 49–52.
3. Дидух Б.И. Упругопластическое деформирование грунтов: монография. – М.: изд-во УДН, 1987. – 166 с.
4. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. – М.: Стройиздат, 1988. – 352 с.
5. Патент на изобретение № 2529977, Российская Федерация. Фундамент с выступами по подошве / А.В. Глушков, Л.А. Бартоломей, В.Е. Глушков. – № 2529977. 2013. – 3 с.
6. Патент на полезную модель № 108053 «Крестообразный фундамент с выступом по подошве». – М., Роспатент, 2011.
7. Сорочан Е.А. Фундаменты промышленных зданий. – М.: Стройиздат, 1986. – 303 с.
8. Шашкин А.Г. Критический анализ наиболее распространенных нелинейных моделей работы грунта / А.Г. Шашкин // Инженерная геология. – 2010. – № 3. – С. 29–37.
9. Esen I. A new finite element for transverse vibration of rectangular thin plates under a moving mass / I. Esen // Finite Elements in Analysis and Design. – 2013. – Vol. 66. № 66. – P. 26–35.
10. Van Baars, S. The inclination and shape factors for the bearing capacity of footings / S. Van Baars // Soils and Foundations. – 2014. – Vol. 54. № 1. – P. 985–992.
11. Wei H.W. Design parameter optimization of beam foundation on soft soil layer with nonlinear finite element / H.W. Wei, Y.Z. Wu, Z.H. Yu // Journal of Central South University. – 2012. – Vol. 19. № 6. – P. 1753–1763.