

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния основания под подошвой ступенчатого штампа с различными геометрическими параметрами

А.И. Мартюшева

Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Аннотация: В данной статье представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния основания под штампами со ступенчатой формой подошвы опирания. Численное моделирование осуществлялось с применением комплекса Plaxis 2D. Результаты моделирования штампов с разными углами схода ступеней при равной площади поверхности контакта с грунтом показали зависимость напряжений и перемещений от данного параметра.

Ключевые слова: эффективный фундамент, фундамент мелкого заложения, столбчатый фундамент, штамп с выпуклой поверхностью опирания, ступенчатая подошва, механика грунтов, осадка фундаментов.

Введение

Развитие традиционных типов фундаментов базируется на поиске рациональных форм, позволяющих снизить напряжения и, соответственно, материалоемкость фундамента, а также напряжения и деформации грунтового основания под фундаментом.

На основе проведенного патентного анализа в области изобретений рациональных форм фундаментов под колонны выделяются два основных направления: поиск рациональной формы тела фундамента; поиск рациональной формы опорной плиты фундамента [1, 2].

Основными целями оптимизации формы опорной плиты являются: необходимость вовлечения большего объема грунта в работу; равномерное распределение эпюры контактных давлений под подошвой фундамента. Достигается это, как правило, за счет изменения формы подошвы в плане [3, 4], и за счет изменения формы поверхности опирания в вертикальной плоскости [5, 6]. Одним из вариантов рациональной формы поверхности опирания в вертикальной плоскости является криволинейная выпуклая форма [7, 8]. Такая форма позволяет снизить напряжения на границах плиты.

Геометрическая форма выпуклой поверхности с оптимальным распределением контактных напряжений зависит от угла внутреннего трения и удельного сцепления грунта в основании фундамента [9].

При практическом применении изготовление плит с криволинейной поверхностью опирания трудоемко, поэтому возможна трансформация данной поверхности в многогранную ступенчатую поверхность или с наклонными плоскостями, вписанную в оптимальную криволинейную форму [10]. Натурные и лабораторные эксперименты, результаты которых представлены в работах [8, 11], подтвердили эффективность выпуклой формы по сравнению с плоской поверхностью опирания.

В данном исследовании проведено численное моделирование работы отдельно стоящего фундамента со ступенчатой подошвой с разными геометрическими характеристиками для оценки их влияния на напряженно-деформированное состояние основания под ним.

Постановка задачи

Для анализа влияния геометрической формы подошвы жесткого штампа была решена упруго-пластичная плоская задача с учетом прочностных и деформационных свойств основания в геотехническом комплексе Plaxis 2D. Расчетная схема приведена на рисунке 1.

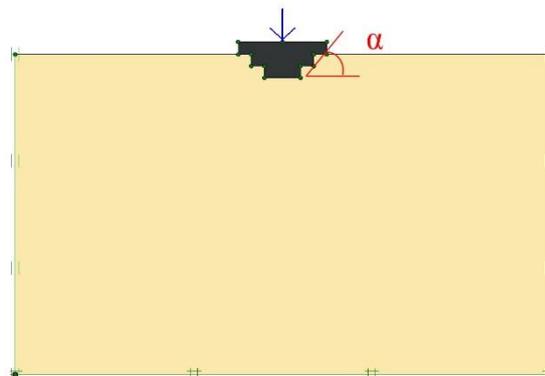


Рис.1. – Расчетная схема тестовой задачи

В качестве варьируемых параметров ступенчатого штампа рассматривались – высота ступени (h), ширина опорной части (b) и угол схода ступеней α . Геометрические схемы штампов представлены в таблице 1.

Таблица №1

Геометрические параметры штампов

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
$b=0,8$ м	$b=0,8$ м	$b=0,8$ м	$b=0,4$ м
$h=0,6$ м	$h=0,45$ м	$h=0,3$ м	$h=0,6$ м
$\alpha=45^\circ$	$\alpha=36^\circ$	$\alpha=27^\circ$	$\alpha=36^\circ$

Задача была выполнена для штампа на несвязном грунтовом основании со следующими характеристиками: песок средней крупности – $\gamma_{\text{unsat}}=1,8$ т/м³; $c=1,0$ кПа; $\phi=35^\circ$; $E=29,2$ МПа; $e=0,65$ ед.; $\nu=0,3$ ед.

Результаты численного моделирования

Результаты максимальных деформаций и напряжений при сравнительной нагрузке $P=300$ кПа представлены в таблице 2.

Таблица №2

Результаты расчета при сравнительной нагрузке $P=300$ кПа

Угол схода ступеней подошвы штампа, град.	Высота схода ступеней h , м	Ширина опорной части нижней ступени, b , м	Максимальные вертикальные перемещения, мм	Максимальные горизонтальные перемещения, мм	Максимальные вертикальные напряжения, кН/м ²
изменение h					
27	0,30	0,80	37,3	5,2	-350,9
36	0,45	0,80	38,2	5,9	-352,5
45	0,60	0,80	41,5	6,5	-543,0
изменение b					
36	0,60	0,40	41,2	5,8	-411,5
45	0,60	0,80	41,5	6,5	-543,0

Графики изменений вертикальных напряжений в основании нижней ступени штампа и вертикальных перемещений от нагрузки при различных углах схода ступеней приведены на рисунках 2 и 3.

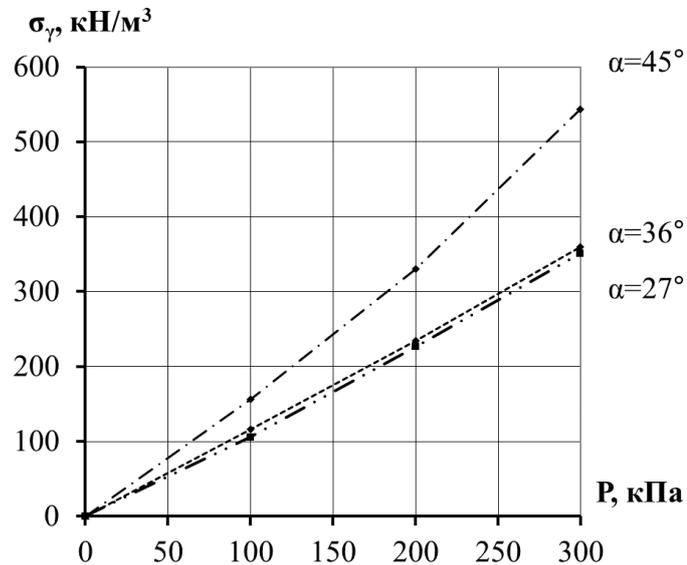


Рис. 2. – График изменения вертикальных напряжений от нагрузки при равной ширине опорной части.

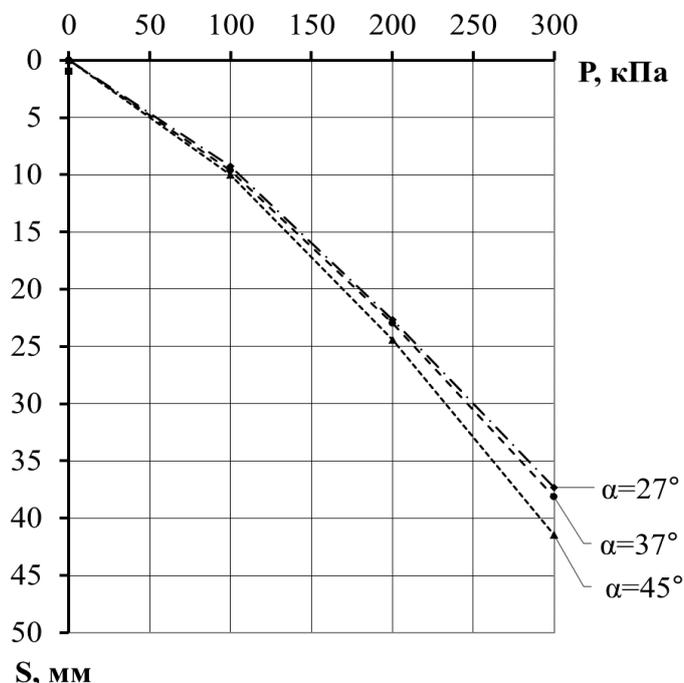


Рис. 3. – График зависимости вертикальных перемещений от нагрузки при равной ширине опорной части.

При равной площади поверхности контакта с грунтом и равной ширине опорной части штампа, уменьшение угла схода ступеней приводит к снижению вертикальных напряжений. Напряжения под штампом с углами схода ступеней $\alpha=27^\circ$ и $\alpha=36^\circ$ практически одинаковые, а при увеличении схода ступеней до угла $\alpha=45^\circ$ напряжения увеличиваются на 54,7% по сравнению с минимальным значением. Аналогичная картина с вертикальными и горизонтальными перемещениями. При угле схода ступеней $\alpha=45^\circ$ вертикальные перемещения на 11,2%, а горизонтальные перемещения на 25% больше по сравнению с соответствующими значениями перемещений для штампа с углом схода ступеней $\alpha=27^\circ$.

При изменении только ширины опорной части нижней ступени и при равном угле схода ступеней показатели перемещений и напряжений имеют незначительные изменения. При сравнительной нагрузке 300 кПа вертикальные перемещения под штампом с углом $\alpha=36^\circ$ и шириной опорной части нижней ступени $b=0,8$ м меньше, чем под штампом с шириной опорной части $b=0,4$ м на 7%, горизонтальные перемещения больше на 1,7%, а вертикальные напряжения меньше на 16,7%.

Поскольку в ряде работ, как указывалось выше, одной из основных характеристик грунта, влияющих на определение оптимальной формы поверхности опирания штампа, выделен угол внутреннего трения, далее было проведено моделирование поведения под нагрузкой штампа с разными углами схода ступеней в грунтах при изменении значения угла внутреннего трения.

На рисунке 4 представлены результаты моделирования вертикальных перемещений в основании штампа при различных значениях угла внутреннего трения грунта.

Как видно из графика, наименьшие вертикальные перемещения при всех значениях угла внутреннего трения у штампа с углом схода ступеней $\alpha=27^\circ$.

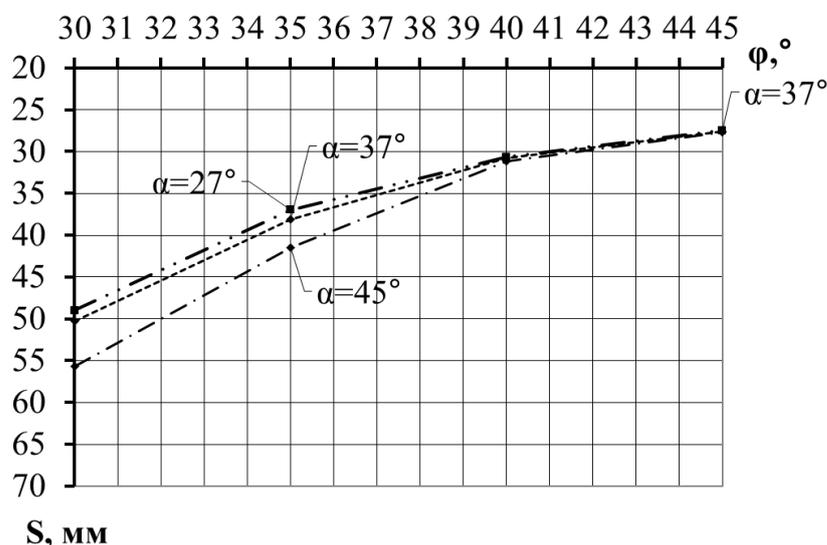


Рис. 4. – Зависимость вертикальных перемещений

На рисунке 5 представлены результаты моделирования горизонтальных перемещений в основании штампа при различных значениях угла внутреннего трения грунта.

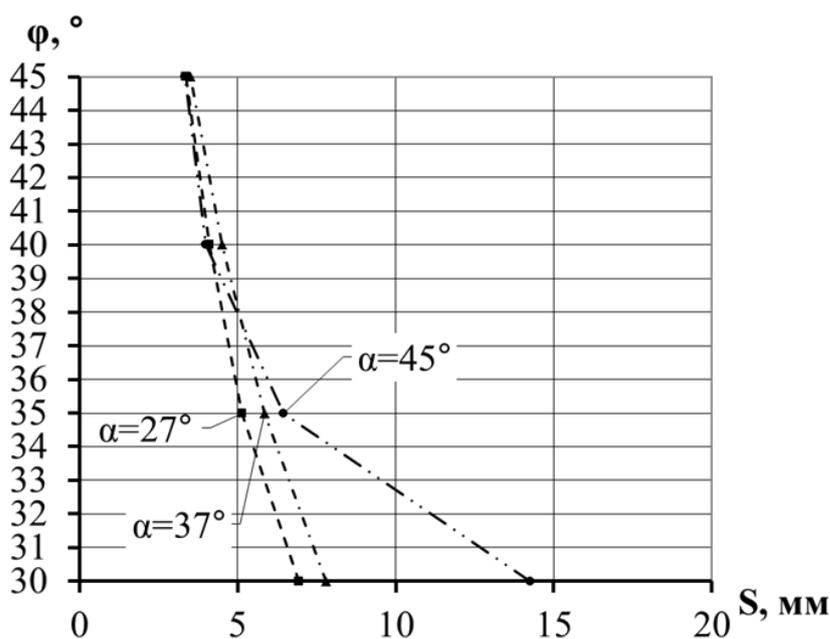


Рис. 5. – Зависимость горизонтальных перемещений

Наименьшие горизонтальные перемещения также при всех значениях угла внутреннего трения у штампа с углом схода ступеней $\alpha=27^\circ$.

При угле внутреннего трения грунта более 40° угол схода ступней практически не влияет на характер вертикальных и горизонтальных перемещений.

Превышение вертикальных и горизонтальных перемещений для угла схода ступней $\alpha=36^\circ$ над перемещениями штампа с углом схода ступеней $\alpha=27^\circ$ остается стабильным в диапазоне значений угла внутреннего трения грунта от 30° до 35° . Для угла схода ступней $\alpha=45^\circ$ происходит резкое изменение перемещений при значении угла внутреннего трения от 30° до 40° .

Выводы

При поиске оптимальной формы подошвы выпуклого фундамента в виде ступенчатой плиты в качестве комплексного показателя, характеризующего высоту и ширину ступеней, принят угол схода ступеней – α .

Для принятых в тестовой задаче прочностных и деформационных свойств основания при изменении высоты схода ступеней и при равной площади поверхности контакта с грунтом, уменьшение угла схода ступеней приводит к снижению вертикальных и горизонтальных перемещений, а также вертикальных напряжений. При этом снижение угла схода ступеней ниже величины угла внутреннего трения не приводит к значительному снижению перемещений и напряжений.

Таким образом, при выборе геометрических параметров фундаментов с выпуклой ступенчатой подошвой, при назначении геометрических размеров ступеней необходимо учитывать угол внутреннего трения грунта в основании, как ориентир для назначения угла схода ступеней.

Литература

1. Мартюшева А.И. Исследование работы отдельного фундамента со ступенчатой подошвой. - Тюмень: ФГБ ОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», 2017. 109 с.

2. Мартюшева, А. И. Рациональные формы отдельных фундаментов мелкого заложения // Международная научно-практическая конференция «Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики». Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. с. 394-400.

3. Глушков А.В. Влияние формы и размеров подошвы фундаментов на напряженно-деформированное состояние основания. Основания и фундаменты. Дисс на соиск. учен. степ. к.т.н.: спец. 05.23.02. Поволжский государственный технологический университет. Йошкар-Ола, 2016. 164 с.

4. Das B. M., Sobhan K. Principles of geotechnical engineering. 9th Ed. Australia, Brazil, Japan, Korea, Mexico, Singapore, Spain, United Kingdom, United States: Cengage Learning, 2012. 726 p.

5. Грицук М.С. Рациональные конструкции плит для ленточных фундаментов. Основания и фундаменты. Дисс на соиск. учен. степ. д.т.н.: спец. 05.23.02. Брестский политехнический институт. Брест, 1998. 283 с.

6. Сафарян, В. С., Бай В.Ф., Еренчинов С. А. Обзор фундаментов мелкого заложения // Инженерный вестник Дона, 2021, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7021.

7. Сафарян В. С., Бай В. Ф., Коркишко А. Н., Чухлатый М. С. Отдельно стоящие фундаменты с неплоской подошвой // Инженерный вестник Дона, 2019, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5870

8. Чикишев В.М., Пронозин Я.А., Мельников Р.В., Епифанцева Л.Р. Экспериментальные исследования влияния поверхности нагружения на деформации глинистого основания // Вестник ТГАСУ, 2010, №2 с.199-204.

9. Хрусталева Е.Н. Способ Хрусталева Е.Н. получения равномерного контактного напряжения при взаимодействии материальных сред. Патент на изобретение №2576542. // Бюллетень, 2016, №7. URL: yandex.ru/patents/doc/RU2576542C2_20160310

10. Maeda, Yo. Bearing capacity of shallow foundation with stepped footing on slopes // Memory of the Faculty of Engineering, Kyushu University, 1992. Vol. 52. No. 2. pp. 201–232.

11. Сафарян, В. С. Отдельностоящий фундамент со ступенчатой подошвой: результаты натурного эксперимента // Архитектура, строительство, транспорт, 2023, № 4(106). с. 17-25.

References

1. Martjusheva A.I. Issledovanie raboty otdel'nogo fundamenta so stupenchatoj podoshvoj [Investigation of the performance of a single foundation with stepped footing]. Tjumen': Tjumenskij industrial'nyj universitet, 2017. 109 p.

2. Martjusheva, A.I. Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet, 2017. pp. 394-400.

3. Glushkov A.V. Vlijanie formy i razmerov podoshvy fundamentov na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie osnovanija [The influence of the shape and size of the foundation base on the stress-strain state of the foundation] Povolzhskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet. Joshkar-Ola, 2016. 164 p.

4. Das B. M., Sobhan K. Principles of geotechnical engineering. 9th Ed. Australia, Brazil, Japan, Korea, Mexico, Singapore, Spain, United Kingdom, United States: Cengage Learning, 2012. 726 p.

5. Gricuk M.S. Racional'nye konstrukcii plit dlja lentochnyh fundamentov [Rational designs of plate for strip foundations]. Brestskij politehnicheskij institut. Brest, 1998. 283 p.



6. Safarjan, V. S., Baj V.F., Erenchinov S. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5870
7. Safarjan V. S., Baj V. F., Korkishko A. N., Chuhlatyj M. S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5870
8. Chikishev V.M., Pronozin Ja.A., Mel'nikov R.V., Epifanceva L.R. Vestnik TGASU 2010. №2. pp. 199-204.
9. Hrustalev E.N. Sposob Xrustaleva E.N. polucheniya ravnomernogo kontaktnogo napryazheniya pri vzaimodejstvii material'ny`x sred. [Khrustalev's method for obtaining uniform contact stress during interaction of material media] Patent RF №2576542. Bjul. 2016. №7. URL: yandex.ru/patents/doc/RU2576542C2_20160310
10. Maeda, Yo. Bearing capacity of shallow foundation with stepped footing on slopes. Memory of the Faculty of Engineering, Kyushu University, 1992. Vol. 52. No. 2. pp. 201-232.
11. Safarjan, V. S. Arhitektura, stroitel'stvo, transport. 2023. № 4(106). pp. 17-25.

Дата поступления: 2.08.2024

Дата публикации: 11.09.2024