

*О.А. Богомолова, к.т.н., доцент
А.А. Иванов, аспирант
А.В. Прокопенко, аспирант
А.Н. Богомолов, д.т.н., профессор*

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ОБЛАСТЕЙ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ОСНОВАНИИ ДВУХЦЕЛЕВОГО ФУНДАМЕНТА

В работе приведены результаты численного моделирования процесса образования и развития областей пластических деформаций в связанном основании двухцелевого фундамента. Построены графические зависимости размеров областей пластических деформаций, развивающихся под пятой и вдоль боковой поверхности фундамента, от величины интенсивности внешнего воздействия, используя которые, можно определить величину расчетного сопротивления и предельно допустимой нагрузки.

Ключевые слова: *двухцелевой фундамент, напряженное состояние, области пластических деформаций, расчетное сопротивление, предельно допустимая нагрузка.*

*О.А. Богомолова, к.т.н., доцент
А.А. Иванов, аспирант
А.В. Прокопенко, аспирант
А.Н. Богомолов, д.т.н., профессор*

Волгоградський державний архітектурно-будівельний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ І РОЗВИТКУ ОБЛАСТЕЙ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ В ОСНОВІ ДВОЦІЛИННОГО ФУНДАМЕНТУ

У роботі наведено результати чисельного моделювання процесу утворення та розвитку областей пластичних деформацій у зв'язній основі двоцилінного фундаменту. Побудовано графічні залежності розмірів областей пластичних деформацій, що розвиваються під п'ятою й уздовж бічної поверхні фундаменту, від величини інтенсивності зовнішнього впливу, використовуючи які, можна визначити величину розрахункового опору і гранично допустимого навантаження.

Ключові слова: *двоцилінний фундамент, напружений стан, області пластичних деформацій, розрахунковий опір, гранично допустиме навантаження.*

*O.A. Bogomolova, Reader, Dr-Ing.
A.A. Ivanov, post-graduate student
A.V. Prokopenko, post-graduate student
A.N. Bogomolov, Prof., DrSc.*

Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering

FORMATION AND DEVELOPMENT MODELING OF THE PLASTIC DEFORMATION FIELD IN THE DOUBLE-SLIT FOUNDATION BASE

The results of numerical formation and development modeling of the plastic deformation fields in connected two-slit based foundation. Graphic dependences of plastic

deformation sizes, which develop under the heel and along the side of the base from the value of the intensity of the external action, using which we can determine the design resistance and maximum permissible load were drawn up.

Keywords: two-slit foundation, stress state, plastic deformation, calculated resistance, the maximum permissible load.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими заданиями. Несущая способность основания щелевого фундамента, возводимого по технологии «стена в грунте», складывается из сил трения и сцепления, действующих по боковой поверхности фундамента $N_{\text{бн}}$, и несущей способности грунта, расположенного непосредственно под подошвами фундамента $N_{\text{нод}}$. Очевидно, что удельный вес первой части несущей способности $N_{\text{бн}}$ тем больше, чем больше при всех прочих равных условиях глубина заложения фундамента.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение проблемы. Анализ данных, приведенных в специальной литературе [1 – 3, 6 – 8], показывает, что глубина заложения щелевых фундаментов может изменяться в интервале $1 \leq h_3 \leq 18$ м.

Щелевые фундаменты обычно устраиваются в связных грунтах, прочностные характеристики которых согласно данным, приведенным в работах [4, 5], изменяются в следующих пределах: угол внутреннего трения $\varphi \in [7^\circ - 30^\circ]$, а удельное сцепление $C \in [9 - 81]$ кПа.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья. Учитывая эти обстоятельства, получается, что величина приведенного давления связности, вычисляемого по формуле $\sigma_{\text{св}} = C(\gamma_3 \text{tg} \varphi)^{-1}$, изменяется в интервале $\gamma_{\text{св}} \in [0,04 - 22]$, при этом геометрические размеры фундамента таковы, что $b/h_3 \in [0,055 - 1]$.

Целью данной работы является определение величины интенсивности равномерно распределенной нагрузки, при которой исчерпывается несущая способность по подошвам и боковой поверхности фундамента, и построение графических зависимостей, определяющих закон развития областей пластических деформаций под подошвами и вдоль боковой поверхности фундамента, в зависимости от величины интенсивности внешнего воздействия.

Изложение основного материала исследований. Все вычислительные операции (при всех возможных сочетаниях численных значений переменных расчетных параметров b/h_3 , $\sigma_{\text{св}}$ и φ) проведены при помощи компьютерной программы [9], разработанной в Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете, в которой для определения полей напряжений формализован метод конечных элементов, а для построения областей пластических деформаций – прием, изложенный в работе [10].

В зависимости от рассматриваемой глубины заложения фундамента изменяются размеры расчетной схемы. Например, при $h_3=1b$ (за одну относительную единицу принята ширина фундамента b), расчетная схема имеет размеры 13×11 , состоит из 28600 треугольных элементов, сопряженных в 14541 узле. При $h_3=18b$ расчетная схема имеет размеры 27×36 , состоит из 48600 треугольных элементов, сопряженных в 26616 узлах.

На рисунках 1, 2 в качестве примеров изображены изолинии трех компонент напряжения и области пластических деформаций при различных значениях интенсивности внешней нагрузки.

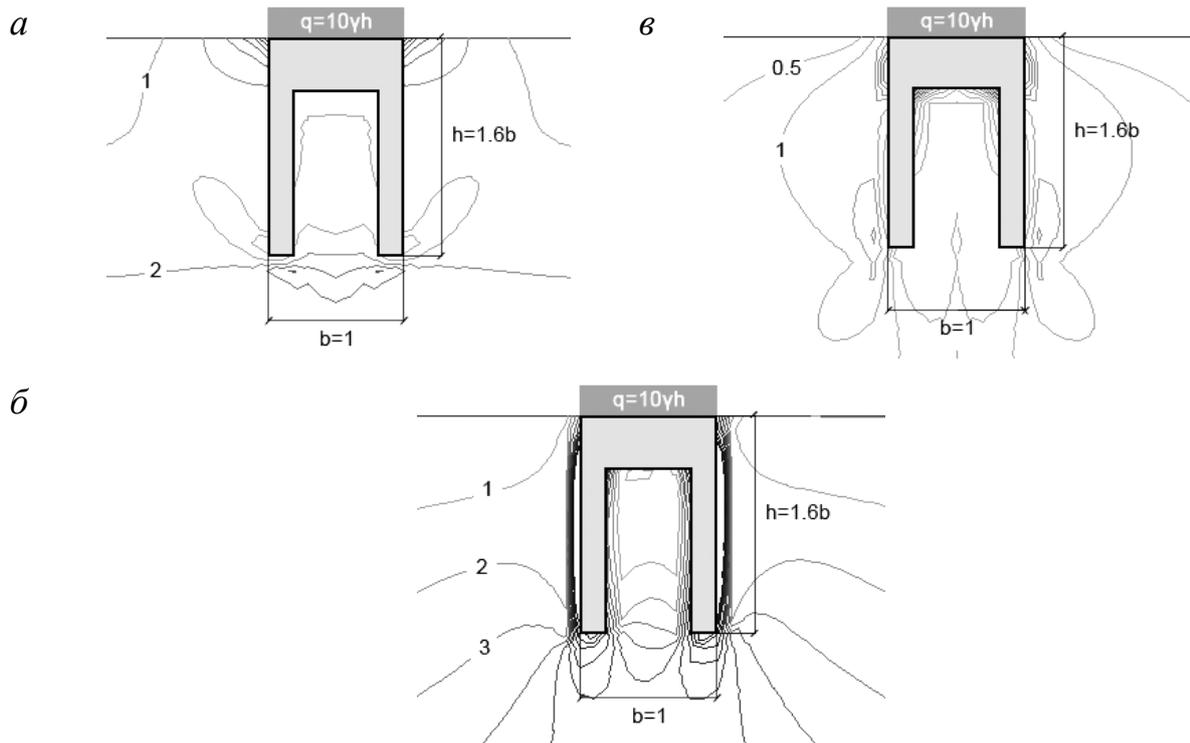


Рисунок 1 – Изолинии трех компонент напряжения и области пластических деформаций: а – горизонтальная σ_x ; б – вертикальная σ_z ; в – касательная τ_{zx} компоненты напряжения при величине отношения ширины фундамента к высоте $b/h_3=0,625$ в долях γh_3

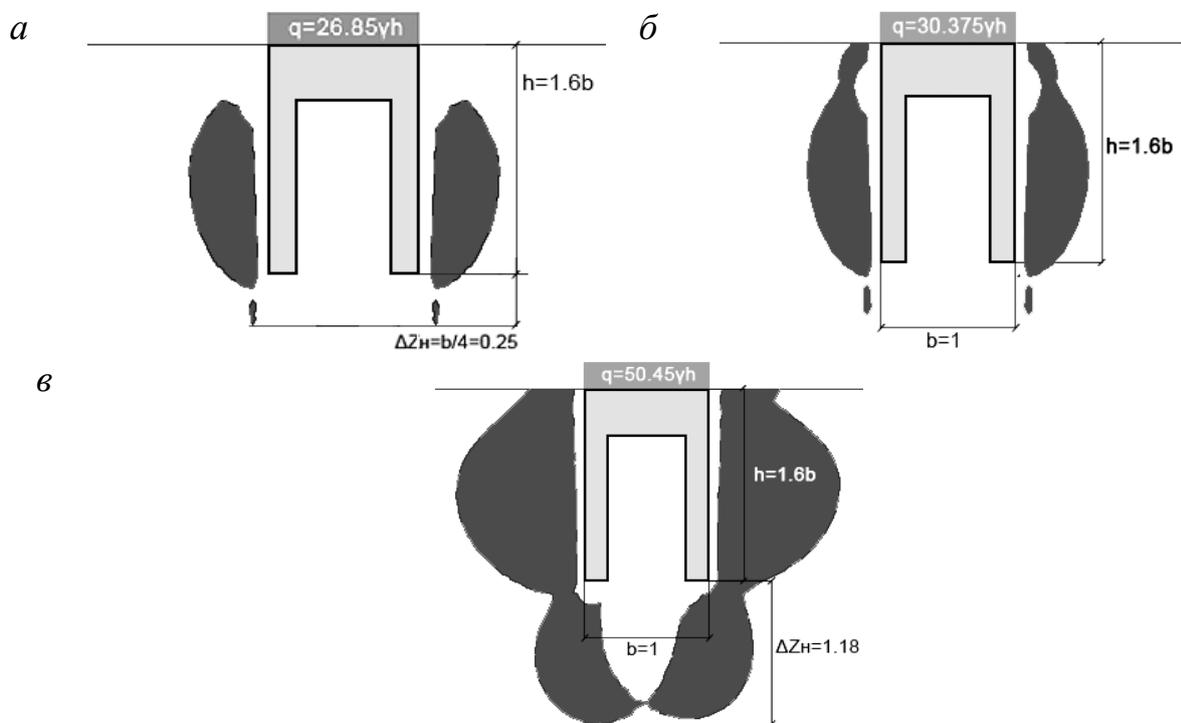


Рисунок 2 – Области пластических деформаций в основании двухциелевого фундамента в момент достижения нагрузки величины расчетного сопротивления R (а), при достижении ОПД дневной поверхности (исчерпание несущей способности по боковой поверхности) (б), при достижении нагрузкой предельно допустимой величины (смыкание ОПД) (в) при $b/h_3=0,625$, $\varphi=22^\circ$, $\gamma_{св}=7$

На рисунке 3 приведена в качестве примера часть графических зависимостей вида $\Delta Z_n = f(q)$, построенных на основе результатов вычислений и соответствующих графических построений для всех возможных сочетаний численных значений переменных расчетных параметров (ΔZ_n и q измеряются соответственно в долях h и γh_3).

Отметим, что начальное значение величины равномерно распределенной внешней нагрузки q_{min} , с которого начинается построение кривых, приведенных на рисунке 3, соответствует тому моменту, когда под левой и правой пятой щелевого фундамента на экране монитора визуально наблюдается появление точек, в которых наступило предельное состояние грунта. Максимальное значение нагрузки q_{max} соответствует моменту времени, когда произошло смыкание образовавшихся с обеих сторон от фундамента областей пластических деформаций. Таким образом, величины q_{min} и q_{max} можно рассматривать как первую критическую и предельно допустимую нагрузки.

Оказалось, что все кривые, приведенные на рисунке 3, практически со 100% степенью точности можно аппроксимировать полиномом второго порядка

$$\Delta Z_n = aq^2 - bq, \quad (1)$$

где $a; b$ – безразмерные коэффициенты; q – величина безразмерной (в долях γh) интенсивности равномерно распределенной нагрузки и ΔZ_n – глубина (в долях h_3) развития областей пластических деформаций.

Одновременно были построены графические зависимости (рис. 4) и получены соответствующие аналитические аппроксимации, определяющие процесс развития областей пластических деформаций, начиная от подошвы фундамента вверх по его боковой поверхности.

Как и ранее оказалось, что аппроксимирующим выражением является полином

$$\Delta Z_{6n} = cq^2 - dq, \quad (2)$$

где ΔZ_{6n} – высота областей пластических деформаций, измеряемая от подошвы фундамента вверх вдоль боковой поверхности.

На рисунке 4 в качестве примера приведена часть построенных графических зависимостей вида $\Delta Z_{6n} = f(q)$. Следует отметить, что максимальное значение нагрузки q_{max} соответствует моменту полного исчерпания несущей способности по боковой поверхности.

Для определения коэффициентов $a; b$ и $c; d$ для всех возможных сочетаний численных значений переменных расчетных параметров построены графики, часть из которых при $\alpha = 22^\circ$ в качестве примера приведена на рисунке 5.

В таблице 1 приведены выражения, определяющие численные значения коэффициентов a, b и c, d с погрешностью, не превышающей 5 %.

Для того, чтобы определить размеры областей пластических деформаций, возникающих под подошвами и вдоль боковой поверхности щелевого фундамента, необходимо задаться численными значениями угла внутреннего трения α , приведенного давления связности $u_{св}$ и отношения геометрических параметров фундамента b/h_3 .

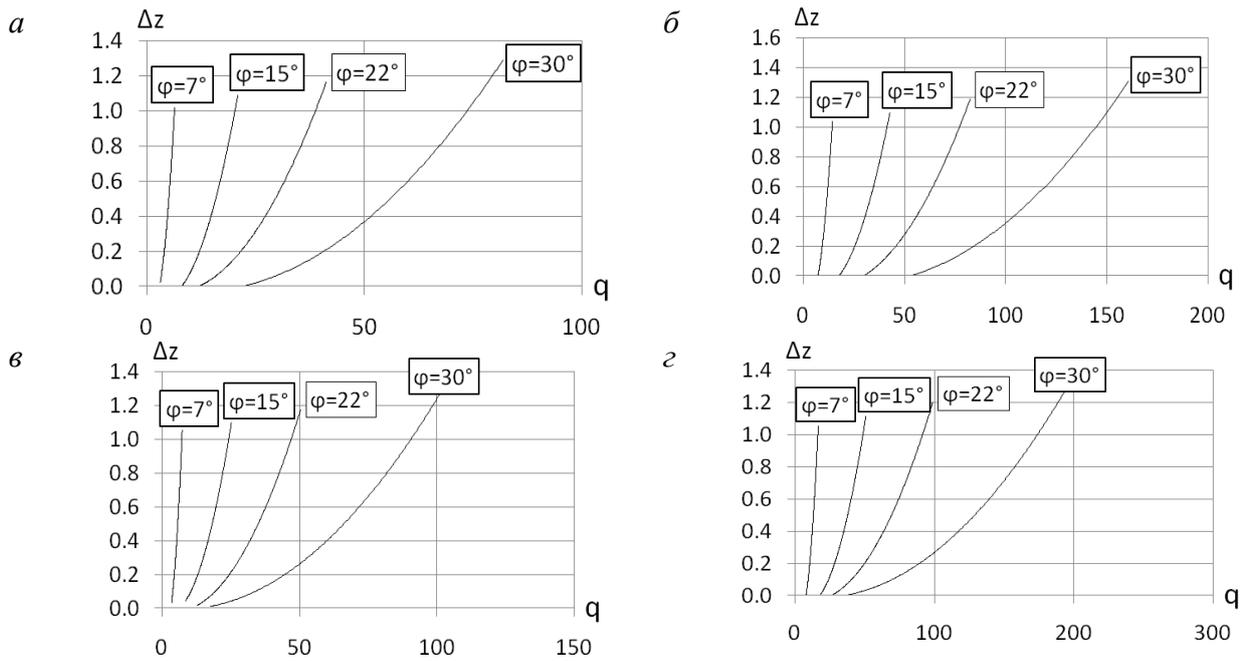


Рисунок 3 – Графические зависимости вида $\Delta Z_H=f(q)$ при: $b/h_3=1, y_{c6}=7$ (а); $b/h_3=1, y_{c6}=15$ (б); $b/h_3=0,625, y_{c6}=7$ (в); $b/h_3=0,625, y_{c6}=15$ (г)

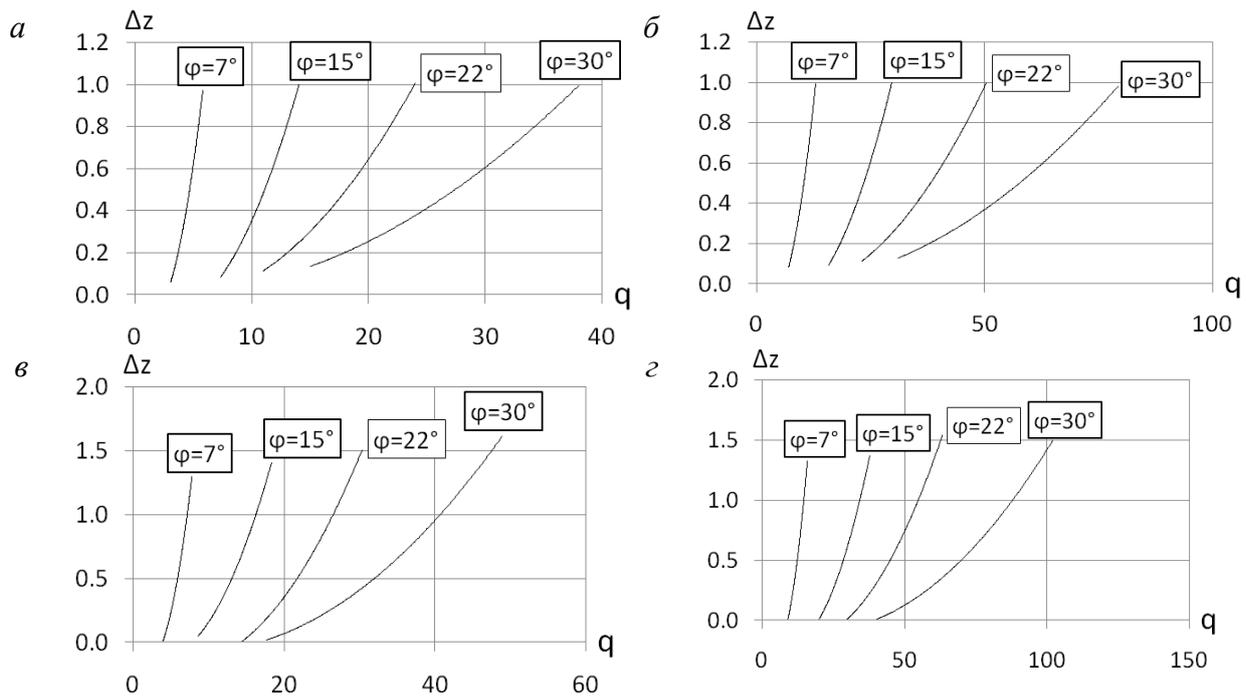


Рисунок 4 – Графические зависимости вида $\Delta Z_{6n}=f(q)$ при: $b/h_3=1, y_{c6}=7$ (а); $b/h_3=1, y_{c6}=15$ (б); $b/h_3=0,625, y_{c6}=7$ (в); $b/h_3=0,625, y_{c6}=15$ (г)

Выбрать из таблицы № 1 соответствующие формулы и определить по ним коэффициенты a, b (c, d). Подставив значения этих коэффициентов и величину внешней нагрузки в выражение 1 или 2, отыщем размеры областей пластических деформаций ΔZ_H и ΔZ_{6n} . Если вместо ΔZ_H подставить значение $b/4$, можно определить величину расчетного сопротивления основания R .

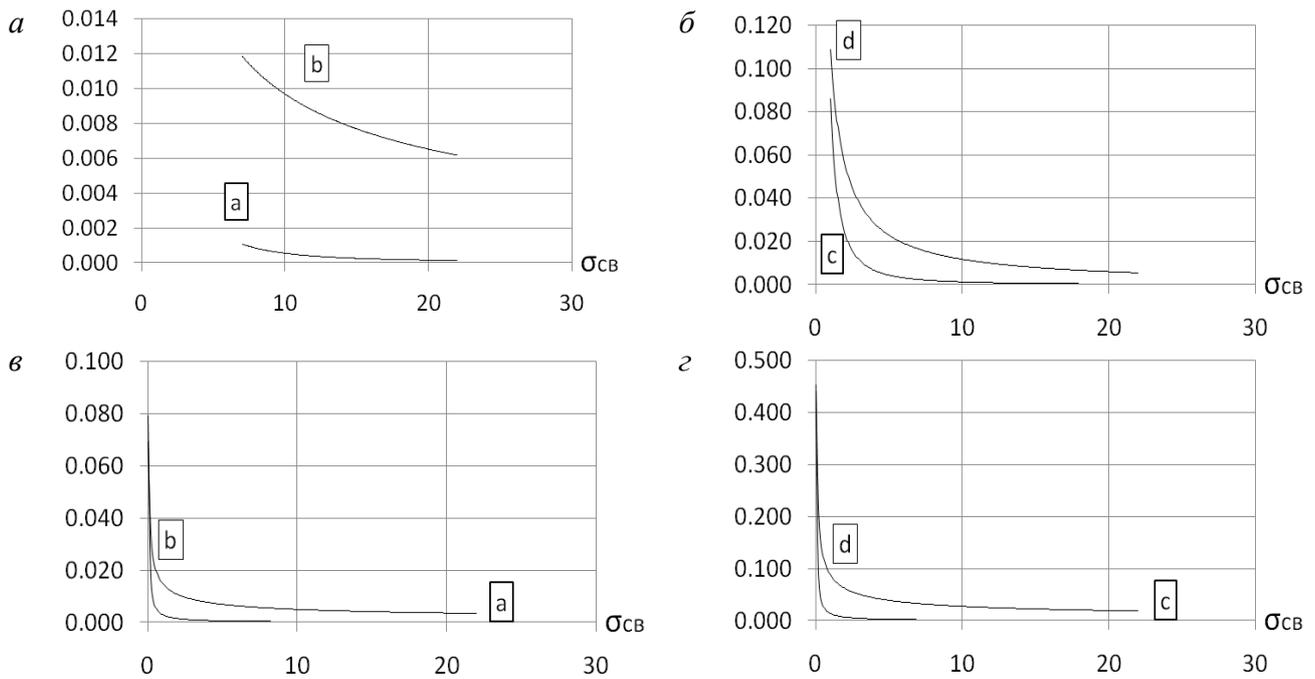


Рисунок 5 – Графические зависимости вида $a, b=f(\sigma_{св})$ (а; в) и $c, d=f(\sigma_{св})$ (б, г) при $b/h_3=1$ и $b/h_3=0,625$ соответственно

Рассмотрим пример. Необходимо определить величину предельно-допустимой нагрузки $q_{нд}$ и нагрузки, при которой исчерпывается несущая способность по боковой поверхности фундамента $q_{бп}$, если $b/h_3=0,77$ (ширина фундамента b принята за условную единицу); $\varphi=22^\circ$; $C=81$ кПа, а объемный вес грунта γ и глубина заложения фундамента h_3 таковы, что величина приведенного давления связности $y_{св}=C(\gamma h_3 \text{tg} \varphi)^{-1}=11$.

Решение. Используя графики, приведенные на рисунке 3, определяем, что для $b/h_3=1$ и $\sigma_{св}=7$ величина $q_{нд}=41,25\gamma h_3$, а $\Delta Z_H=1,19b$. При $\sigma_{св}=15$ эти величины соответственно равны $q_{нд}=82,40\gamma h_3$ и $\Delta Z_H=1,21b$. Проведя операцию линейного интерполирования, получим, что при $\sigma_{св}=11$ $q_{нд}=61,825\gamma h_3$ и $\Delta Z_H=1,2b$.

Аналогично для $b/h_3=0,625$ имеем при $\sigma_{св}=7$ - $q_{нд}=5045\gamma h_3$; $\Delta Z_H=1,18b$, а при $\sigma_{св}=15$ - $q_{нд}=98,84\gamma h_3$, $\Delta Z_H=1,21b$.

Интерполируя полученные значения, находим, что при $\sigma_{св}=11$ и $b/h_3=0,77$ $q_{нд}=68,25\gamma h_3$ и $\Delta Z_H=1,2b$.

Используя аналогичным образом графики, приведенные на рисунке 4, определяем величину интенсивности равномерно распределенной нагрузки, при которой исчерпывается несущая способность по боковой поверхности фундамента, т.е. при $\Delta Z_{бп}=h_3$. Имеем для $b/h_3=1$ при $\sigma_{св}=7$ - $q_{бп}=24\gamma h_3$, $\Delta Z_{бп}=1b$; при $\sigma_{св}=15$ - $q_{бп}=50,338\gamma h_3$, $\Delta Z_{бп}=1b$. Для $b/h_3=0,625$ при $\sigma_{св}=7$ - $q_{бп}=30,375\gamma h_3$, $\Delta Z_{бп}=1,6b$; при $\sigma_{св}=15$ - $q_{бп}=63,25\gamma h_3$, $\Delta Z_{бп}=1,6b$.

Дважды проведя операцию интерполирования полученных значений, находим, что при $b/h_3=0,77$ $q_{бп}=42\gamma h_3$ и $\Delta Z_{бп}=1,3b$.

Решить поставленную задачу можно, используя формулы (1, 2) и выражения для определения соответствующих коэффициентов, приведенные в таблице № 1. В этом случае получим, что $q_{бп}=46\gamma h_3$, а $\Delta Z_{бп}=1,3b$.

Таблица 1 – Зависимости вида $a, b(c, d)=f(\sigma_{св})$

$b/h_3=1$					
ΔZ_H			$\Delta Z_{\bar{O}n}$		
φ	a	b	φ	c	d
7°	$4.2335y_{CB}^{-2.241}$	$0.893y_{CB}^{-0.984}$	7°	$2.6839y_{CB}^{-2.016}$	$0.931y_{CB}^{-0.968}$
15°	$0.137y_{CB}^{-1.816}$	$0.1629y_{CB}^{-0.825}$	15°	$0.2386y_{CB}^{-1.754}$	$0.1817y_{CB}^{-0.713}$
22°	$0.0477y_{CB}^{-1.95}$	$0.036y_{CB}^{-0.571}$	22°	$0.086y_{CB}^{-1.857}$	$0.1089y_{CB}^{-0.969}$
30°	$0.0021y_{CB}^{-1.2}$	$0.0119y_{CB}^{-0.422}$	30°	$0.0321y_{CB}^{-1.921}$	$0.041y_{CB}^{-1.304}$
$b/h_3=0.625$					
ΔZ_H			$\Delta Z_{\bar{O}n}$		
φ	a	b	φ	c	d
7°	$1.9261y_{CB}^{-2.068}$	$0.6341y_{CB}^{-0.904}$	7°	$1.2734y_{CB}^{-1.735}$	$0.6347y_{CB}^{-0.675}$
15°	$0.0046y_{CB}^{-0.698}$	$0.0443y_{CB}^{-0.522}$	15°	$0.052y_{CB}^{-1.177}$	$0.209y_{CB}^{-0.603}$
22°	$0.0029y_{CB}^{-1.025}$	$0.0148y_{CB}^{-0.478}$	22°	$0.0136y_{CB}^{-1.081}$	$0.0878y_{CB}^{-0.51}$
30°	$0.0002y_{CB}^{-0.62}$	$0.0058y_{CB}^{-0.531}$	30°	$0.0072y_{CB}^{-1.281}$	$0.0699y_{CB}^{-0.754}$
$b/h_3=1/6=0.167$					
ΔZ_H			$\Delta Z_{\bar{O}n}$		
φ	a	b	φ	c	d
7°	$4.1425y_{CB}^{-2.439}$	$0.769y_{CB}^{-0.953}$	7°	$0.038y_{CB}^{-1.045}$	$0.1488y_{CB}^{-0.549}$
15°	$0.0013y_{CB}^{-0.5}$	$0.0224y_{CB}^{-0.305}$	15°	$0.0042y_{CB}^{-0.696}$	$0.056y_{CB}^{-0.237}$
22°	$0.0004y_{CB}^{-0.564}$	$0.0093y_{CB}^{-0.219}$	22°	$0.0021y_{CB}^{-0.832}$	$0.0787y_{CB}^{-0.546}$
30°	$0.0001y_{CB}^{-0.62}$	$0.0034y_{CB}^{-0.23}$	30°	$0.0015y_{CB}^{-1.062}$	$0.0671y_{CB}^{-0.923}$
$b/h_3=1/12=0.083$					
ΔZ_H			$\Delta Z_{\bar{O}n}$		
φ	a	b	φ	c	d
15°	$0.0148y_{CB}^{-1.773}$	$0.0358y_{CB}^{-0.649}$	15°	$0.019y_{CB}^{-1.691}$	$0.0342y_{CB}^{-0.398}$
22°	$0.0012y_{CB}^{-1.547}$	$0.0098y_{CB}^{-0.615}$	22°	$0.0102y_{CB}^{-1.68}$	$0.2376y_{CB}^{-1.028}$
30°	$0.0001y_{CB}^{-1.278}$	$0.0004y_{CB}^0$	30°	$0.0101y_{CB}^{-2.025}$	$0.8424y_{CB}^{-1.774}$
$b/h_3=1/18=0.056$					
ΔZ_H			$\Delta Z_{\bar{O}n}$		
φ	a	b	φ	c	d
15°	$0.003y_{CB}^{-1.355}$	$4.2507y_{CB}^{-2.771}$	15°	$0.0004y_{CB}^{-0.595}$	$3.6884y_{CB}^{-2.515}$
22°	$0.0002y_{CB}^{-1.168}$	$0.016y_{CB}^{-1.098}$	22°	$0.0031y_{CB}^{-1.401}$	$0.0593y_{CB}^{-0.582}$
30°	$0.0116y_{CB}^{-3.341}$	$0.0075y_{CB}^{-1.377}$	30°	$0.0016y_{CB}^{-1.43}$	$0.3608y_{CB}^{-1.28}$

Полученные результаты проверены при помощи численного решения поставленной задачи с использованием компьютерной программы [9]. Для этого составлена расчетная схема МКЭ, имеющая размеры $(13 \times 11)b$, состоящая из 28600 треугольных элементов, сопряженных в 14541 узле.

В результате вычислений получено, что при смыкании ОПД под фундаментом $q_{пд}^k = 68,25 \gamma h_3$, а при $\Delta Z_{\bar{O}n} = 1,3b$ $q_{\bar{O}n}^k = 40 \gamma h_3$. Из сравнения этих результатов с предыдущими видно, что величина $q_{пд}^k$ полностью совпадает с первым результатом, найденным при графиках, приведенных на рисунке 3, и на 2 % отличается от третьего результата, найденного при помощи данных, помещенных в таблице № 1. Величина $q_{\bar{O}n}^k$ на 5% отличается от результата, полученного на основе графиков, приведенных на

рисунке 4, и на 13 % – от значения $q_{\text{бп}}$, вычисленного при помощи выражений, содержащихся в таблице №1.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие **выводы**:

1. При нагружении двухщелевого фундамента в условиях, соответствующих принятым в настоящей работе, исчерпание несущей способности основания первоначально происходит по контакту «боковая поверхность фундамента – грунт». Доля несущей способности, приходящейся на боковую поверхность, составляет приблизительно 65 % от ее полного значения.

2. Предложены графические зависимости и формулы, позволяющие проводить с достаточной для инженерной практики степенью точности оценку несущей способности основания двухщелевого фундамента с разделением ее на части, соответствующие боковой поверхности и подошве фундамента.

Литература

1. Павлов, В.В. Щелевые фундаменты / В.В. Павлов. – Красноярск: Стройиздат, 1992. – 139с.
2. Смородинов М.И. Устройство сооружений и фундаментов способом "стена в грунте" / Смородинов, Федоров Б.С. – М.: Стройиздат, 1986. – 216 с.
3. ТКП 45-5.01-39-2006 (02250). Фундаменты щелевые. Правила проектирования и устройства. – Минск.: РУП "Стройтехнорм", 2006. – 50 с.
4. СНиП 2.02.01-83. Приложение 1. Нормативные значения прочностных и деформационных характеристик грунтов. – М.: Стройиздат, 1985. – 40 с.
5. Каган, А.А. Расчетные характеристики грунтов / Каган А.А. – М.: Стройиздат, 1985. – 247 с.
6. Основания, фундаменты и подземные сооружения / [М.И. Горбунов-Посадов, В.А. Ильичев, В.И. Крутов и др.]. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.
7. Основания и фундаменты: справочник / Г. И. Швецов, И. В. Носков, А.Д. Слободян, Г.С. Госькова; под ред. Г. И. Швецова. – М.: Высш. шк, 1991. – 383 с.
8. Подземные сооружения, возводимые способом "стена в грунте" / В.М. Зубков [и др.]; под общ. ред. В. М. Зубкова. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1977. – 200 с.
9. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние) / [А.Н.Богомолов и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009613499 от 30 июня 2009 г.
10. Богомолов, А.Н. О некоторых допущениях и их последствиях при решении задачи об определении областей предельного состояния в основании заглубленного фундамента / А.Н. Богомолов, И.И. Никитин // Вестник ВолГАСУ Сер.: Технические науки. – Волгоград : Изд-во ВолГАСУ, 2003. – Вып. 2/3 (8). – С. 22–27.

Надійшла до редакції 21.09.2012

© О.А. Богомолова, А.А. Иванов, А.В. Прокопенко, А.Н. Богомолов