

УДК 622

В.А. Миронов, О.Е. Софьин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ВОДОНАСЫЩЕННОГО ОСНОВАНИЯ
ПРИ НАГРУЖЕНИИ ЖЕСТКИМ ШТАМПОМ**

Проведено численное моделирование взаимодействия жесткого штампа с водонасыщенным основанием с учетом пластического деформирования грунта. Показано, что напряженно-деформированное состояние и несущая способность водонасыщенного основания существенно зависят от возникающего в грунте порового давления.

Ключевые слова: горные породы, упругопластическая модель, водонасыщенное основание, напряженно-деформированное состояние, несущая способность.

Проблема оценки несущей способности оснований сооружений должна рассматриваться в зависимости от характера грунтов и темпов строительства. При быстром нагружении глинистые водонасыщенные основания находятся в нестабилизированном состоянии вследствие фильтрационной консолидации. Возникающее поровое давление снижает трение в грунте, способствуя переходу основания в предельное по прочности состояние.

В предлагаемой работе исследовалось напряженно-деформированное состояние водонасыщенного грунтового основания в нестабилизированном состоянии при нагружении жестким штампом.

Механическое поведение грунта описывалось математической моделью, построенной в рамках теории пластического течения с упрочнением.

Согласно используемой модели, полная деформация грунта складывается из упругой и пластической частей:

$$\left. \begin{aligned} d\epsilon &= d\epsilon^e + d\epsilon^p; \\ d\gamma_{\text{окт}} &= d\gamma_{\text{окт}}^e + d\gamma_{\text{окт}}^p, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $d\epsilon = d\epsilon_1 + d\epsilon_2 + d\epsilon_3$ – приращение объемной деформации;

$d\gamma_{\text{окт}} = 2/3 \sqrt{(d\epsilon_1 - d\epsilon_2)^2 + (d\epsilon_2 - d\epsilon_3)^2 + (d\epsilon_3 - d\epsilon_1)^2}$ – приращение деформации сдвига на октаэдрической площадке.

Упругая деформация удовлетворяет закону Гука

$$d\epsilon^e = \frac{3(1-2\nu)}{E} dp; \quad d\gamma_{\text{окт}}^e = \frac{2(1+\nu)}{E} dq, \quad (2)$$

где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона;

$d\rho = 1/3(d\sigma_1 + d\sigma_2 + d\sigma_3)$, $dq = 1/3\sqrt{(d\sigma_1 - d\sigma_2)^2 + (d\sigma_1 - d\sigma_3)^2 + (d\sigma_3 - d\sigma_2)^2}$ – приращения нормального и касательного напряжений на октаэдрической площадке.

Соотношения для пластической деформации выводятся из ассоциированного закона течения:

$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial p}; \quad d\gamma_{\text{oxt}}^p = \frac{2}{3} d\lambda \frac{\partial f}{\partial q} = d\lambda \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial f}{\partial p}, \quad (3)$$

где $\Lambda = d\varepsilon^p / d\gamma_{\text{oxt}}^p$ – коэффициент дилатансии; f – пластический потенциал.

Поверхность нагружения модели, являющаяся одновременно поверхностью пластического потенциала, определяется уравнением [1, 2]

$$f(p, q, p_0) = q^2 - N^2 p^2 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^\beta \right] = 0, \quad (4)$$

где $q = 1/3\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$, $p = 1/3(q_1 + q_2 + q_3)$ – касательное и нормальное напряжения на октаэдрической площадке; p_0 – давление предварительного уплотнения; $N = \sqrt{a/(b-1)}$; $\beta = 2(b-1)$ – параметры модели, определяемые через постоянные a и b дилатационного соотношения

$$\Lambda = \frac{3}{2} \left(\frac{a}{\eta} - b \eta \right). \quad (5)$$

Здесь η – коэффициент трения. При $p = 0$ коэффициент трения $\eta_{max} = N$. В критическом состоянии грунта, реализуемом при давлении $p_c = p_0(b)^{-\frac{1}{2(b-1)}}$, $\eta_c = M = \sqrt{a/b}$.

За параметр упрочнения грунта выбирается пластическая деформация объема ε^p , определяемая величиной гидростатического давления p . Зависимость ε^p – p принимается в виде [2]:

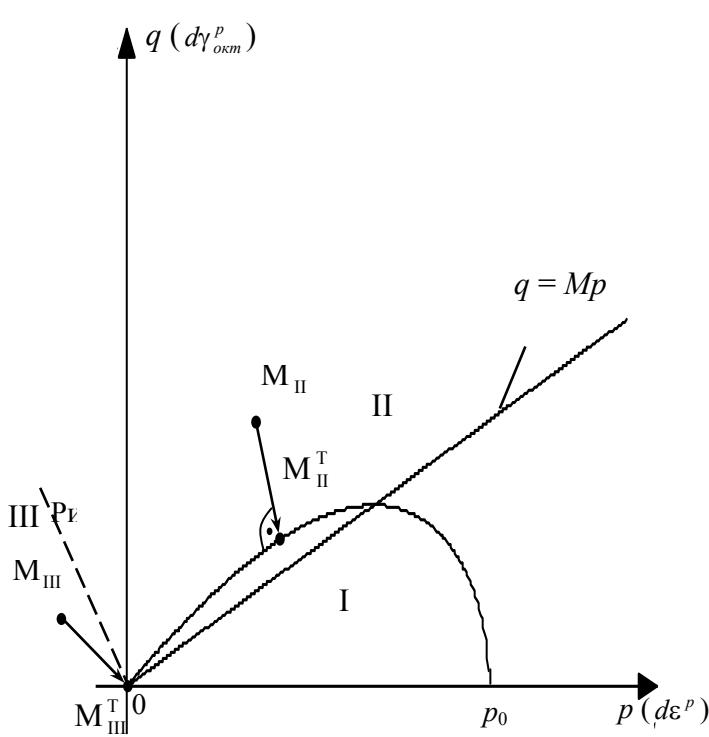
$$\varepsilon^p = \frac{C}{1-\alpha} p^{1-\alpha}, \quad (6)$$

где α, C – параметры модели.

Решение краевой задачи проводилось в пространственной постановке методом конечных элементов.

Изменение напряженно-деформированного состояния водонасыщенного основания определяется на основе совместного решения уравнения равновесия системы элементов и уравнения сплошности потоков в ней [3, 4], которые для n -го шага по времени записываются в виде:

$$\begin{bmatrix} [K] & [C] \\ [C]^T & -\Delta t [K_\phi] - [E] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta \\ p^w(t_n) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta f + [C]^T \{p^w(t_{n-1})\} \\ -[E] \{p^w(t_{n-1})\} \end{Bmatrix}. \quad (7)$$



где $[K]$ – матрица жесткости системы; $[C]$ – «стыковочная» матрица между деформационной и фильтрационной частями задачи; $[K_\phi]$ – фильтрационная матрица системы; $[E]$ – матрица сжимаемости поровой жидкости, зависящая от модуля ее объемной деформации и пористости грунта; $\{\Delta\delta\}$ – приращения перемещений; $\{p^w\}$ – поровое давление; $\{\Delta f\}$ – приращение внешней нагрузки.

Решение полной системы уравнений (7) проводится шаговым методом по времени в неявном виде с учетом граничных условий. Алгоритм, использующий соотношения теории течения с упрочнением, строится на каждом шаге на основе итерационного процесса метода начальных напряжений [5].

На каждом шаге, определяются упругие напряжения в каждом элементе. Полученные напряжения прибавляются к накопленным на предыдущем шаге напряжениям в данном элементе и вычисляются главные суммарные напряжения, которые сравниваются с границами поверхности нагружения.

Если действующие напряжения не выходят за пределы поверхности нагружения, ограничивающей зону I (рис. 1), то деформации грунта являются упругими и напряжения не корректируются. Если точка заданных напряжений находится за пределами поверхности нагружения в зоне II, то теоретическая точка лежит на пересечении прямой $M_{II}M_{II}^T$ с поверхностью нагружения.

Направление прямой $M_{II}M_{II}^T$ в пространстве новых напряжений определяется законом пластического течения

$$\frac{2}{3}\Lambda(1+\nu)(q^c - q) - (1-2\nu)(p^c - p) = 0. \quad (8)$$

Совместное решение уравнений (4) и (8) методом Ньютона позволяет получить координаты точки M_{II}^T – теоретические напряжения q и p . Главные напряжения находятся по формулам:

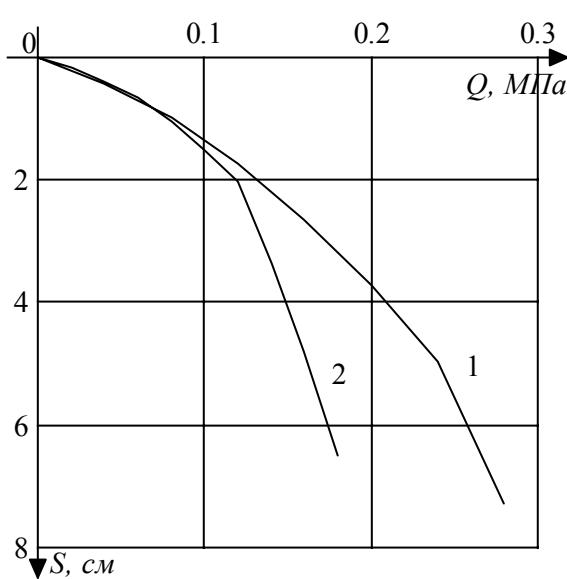


Рис. 2. Зависимость осадки фундамента от нагрузки: 1 – медленное нагружение; 2 – быстрое нагружение

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= p + \frac{3 - \mu_\sigma}{\sqrt{2(3 + \mu_\sigma^2)}} q; \\ \sigma_2 &= p + \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{2(3 + \mu_\sigma^2)}} q; \\ \sigma_3 &= p - \frac{3 + \mu_\sigma}{\sqrt{2(3 + \mu_\sigma^2)}} q, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где
 $\mu_\sigma = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ – параметр вида напряженного состояния.

Давление p_0 определяется величиной объемной пластической деформации, полученной на предыдущей итерации.

Если точка заданных напряжений находится в зоне III, то элемент среды будет разрушен по трем направлениям, т.е. $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

Разница между суммарными и теоретическими напряжениями принимается за начальные напряжения.

На основе разработанного алгоритма составлена вычислительная программа для ЭВМ.

Расчет процесса деформирования грунтового водонасыщенного основания выполнен для случая его загружения жестким заглубленным квадратным штампом со стороной 1 м.

Размеры расчетной области фундамент-основание приняты $8 \times 8 \times 4$ м. Вследствие осевой симметрии задачи рассматривалась только ее одна четвертая часть, разбитая на конечные элементы – тетраэдры.

Границные условия задавались в виде сил, перемещений и поровых давлений. На боковых границах обеспечивалось закрепление узлов в горизонтальном направлении, на нижней границе – в трех направлениях. Боковые и нижняя границы принимались водонепроницаемыми, верхняя – фильтрующей. Внешняя нагрузка на фундамент моделировалась узловыми силами.

Грунт основания имел характеристики: удельный вес $\gamma = 20,0$ кН/м³; модуль деформации $E = 6,0$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,42$; коэффициент пористости $n = 1,2$; модуль объемной сжимаемости поровой жидкости $K = 2 \cdot 10^3$ МПа; коэффициент фильтрации $k_f = 1,0 \cdot 10^{-4}$ м/сут; параметры $A = 0,33$; $B = 1,667$; $C = 0,071$; $\alpha = 0,66$.

Пригрузка штампа моделировалась водопроницаемым слоем грунта толщиной 0,5 м с уменьшенным на три порядка модулем деформации.

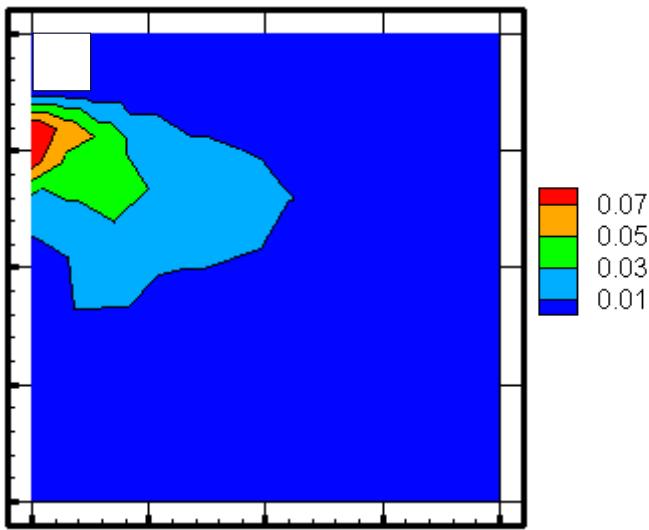


Рис. 3. Распределение порового давления p^w (МПа) в основании при нагрузке на штамп $Q = 0,18$ МПа

фик, соответствующий медленному нагружению, при котором поровое давление пренебрежимо мало. Видно, что зависимости имеют нелинейный характер во всем диапазоне нагрузок.

При быстром нагружении предельная нагрузка на основание существенно ниже. Это объясняется тем, что возникающее в результате уплотнения грунта поровое давление не успевает рассеяться за время нагружения. Часть сжимающих напряжений воспринимается поровой жидкостью, при этом скелет грунта разгружается. Сдвигающие же напряжения полностью воспринимаются скелетом. В результате грунт переходит в предельное состояние. Развитие в основании зон пластических деформаций приводит к дополнительным осадкам и снижению несущей способности.

Предельная нагрузка, соответствующая исчерпанию несущей способности основания, составила 0,18 МПа, что в 1,55 раза меньше, чем при медленном нагружении. В расчетах осадка штампа по достижению максимальной нагрузки прогрессирующее увеличивалась, а итерационный процесс расходился.

Наибольшее поровое давление возникает под центром штампа на глубине 0,5 м от подошвы. С ростом нагрузки поровое давление увеличивается и при $Q = 0,18$ МПа его максимальное значение составляет порядка 0,07 МПа (рис. 3).

На рис. 4 представлены изолинии объемной пластической деформации при максимальной нагрузке на штамп $Q = 0,18$ МПа. В процессе нагружения водонасыщенного основания пластическая деформация возникает под всей подошвой штампа. Наибольшее необратимое уплотнение 0,05 наблюдается под центром штампа на глубине 0,3 м, а уплотненное ядро под штампом не образуется.

На первом шаге численного решения рассчитывалось напряженное состояние от собственного веса грунта, по которому определялась начальная поверхность нагружения. На следующих шагах производилось ступенчатое нагружение штампа вертикальной нагрузкой со скоростью 0,05 МПа/сут (быстрое нагружение) до исчерпания основанием несущей способности.

Результаты расчета в виде графика зависимости осадки штампа S от нагрузки Q представлены на рис. 2. Там же для сравнения приведен

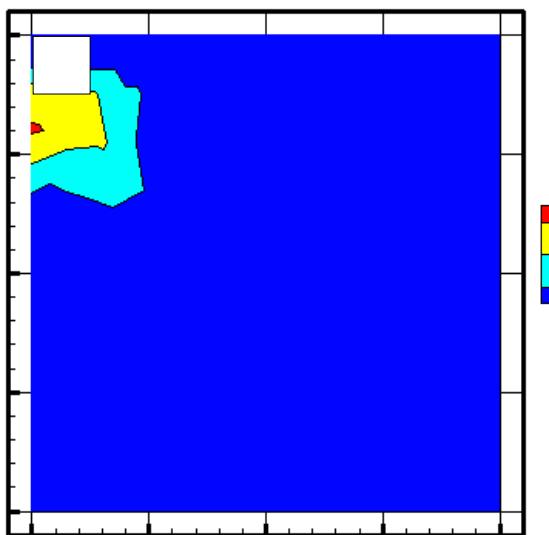


Рис. 4. Изолинии объемной пластической деформации ε^p в основании при $Q = 0,18 \text{ МПа}$

Результаты численного расчета показали, что напряженно-деформированное состояние и несущая способность водонасыщенного основания существенно зависят от возникающего в грунте порового давления. Чем выше скорость нагружения, тем больше поровое давление. Для одного и того же уровня нагрузки при быстром режиме нагружения осадка штампа больше, чем при нагружении с меньшей скоростью, вследствие интенсивного развития пластических зон. Несущая способность грунтового основания с увеличением скорости нагружения снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов В.А., Софын О.Е. Построение модели грунтов на основе концепции критических состояний / Вестник Отделения строительных наук. Т. 1. Вып.13. 2009. С. 215-221.
2. Федоровский В.Г. Некоторые возможности построения моделей грунтов на основе концепции критического состояния/ Современные проблемы нелинейной механики грунтов, -1987. -С. 55-68.
3. Зарецкий Ю.К., Орехов В.В. Напряженно-деформированное состояние грунтового основания под действием жесткого фундамента // Основания, фундаменты и механика грунтов. -1983. -№ 6. -С. 21-24.
4. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Упруговязкопластическая модель структурно-неустойчивого глинистого грунта// Реконструкция городов и геотехническое строительство. -2005. -№ 9. -С. 221-228.
5. Миронов В.А., Софын О.Е., Гудий А.Н. Пластическое течение грунтового основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2008. № 4. С. 2-7. ГИАБ

Коротко об авторах –

Миронов В.А. – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Автомобильные дороги, основания и фундаменты» Тверского государственного технического университета.

Софын О.Е. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги, основания и фундаменты» Тверского государственного технического университета.
E-mail: sofjin@mail.ru