УДК 624.154.001.4

Б.С. Юшков, Д.С. Репецкий

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА НА ДВУХКОНУСНУЮ СВАЮ

Приведен алгоритм расчета сопротивления двухконусной пустотелой пирамидальной сваи, погруженной в пучинистый водонасыщенный глинистый грунт, при действии отрицательных температур, вызывающих морозное пучение грунта, направленное на выдергивание сваи.

Ключевые слова: пучинистый грунт, морозное пучение, промерзание, касательные напряжения, деформации, нагрузка.

B.S. Yushkov, D.S. Repetskii

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE METHOD OF FORCES FROST HEAVING OF THE GROUND ON TWO CONICAL PILE

In the article the algorithm of calculation of the resistance of two cone-shaped hollow pyramid piles, sunk in heaving water-saturated clay soil at action of low temperatures, causing frost heaving of the ground aimed at pulling the piles.

Keywords: heaving soil frost heave, freezing, and shear stresses, deformation, load.

Не вдаваясь в физическую природу процессов послойного пучения грунта при промерзании, примем во внимание лишь конечный результат – увеличение объема грунта при промерзании. Анализ процесса взаимодействия сваи с пучинистым грунтом при этом сводится к осесимметричной задаче определения усилий, возникающих на поверхности контакта абсолютно жесткого конусообразного неподвижного включения, защемленного ниже глубины промерзания, с расширяющимся линейно деформируемым слоем грунта толщиной d_f (рис. 1) [1].

На бесконечно удаленной границе Γ_4 равны нулю радиальные перемещения и касательные напряжения $\left(\lim_{r \rightarrow \infty} U_r = 0; \lim_{r \rightarrow \infty} \tau_{rz} = 0\right)$; на нижней границе слоя Γ_3 равны нулю вертикальные перемещения и касательные напряжения.

тельные напряжения ($U_z=0; \tau_{rz}=0$); поверхность грунта Γ_2 свободна от нагрузок ($\sigma_z^*=0; \tau_{rz}=0$); на поверхности контакта неподвижного конуса Γ_1 с грунтом предполагается полное прилипание ($U_r=0; U_z=0$).

Предположим далее, что при морозном пучении величина подъема слоев грунта линейно возрастает, начиная с глубины промерзания. Это означает, что объемная деформация фазовых превращений $3\varepsilon_0$ есть постоянная величина.

В этом случае перемещения, вызываемые деформациями фазовых превращений ε_0 , совпадают с перемещениями, вызываемыми фиктивными распределенными по поверхности тела нормальными усилиями [2]:

$$p = \frac{E}{(1-2\nu)} \varepsilon_0.$$

Полное напряжение, вызываемое неоднородными деформациями фазовых превращений, получается с помощью наложения гидростатического давления p на напряжения, вызываемые вышеуказанными поверхностными силами.

При таком подходе деформация морозного пучения ε_{fh} равна осевой деформации ε_z при растяжении линейно деформированного слоя толщиной $h = d_f$ (глубина промерзания) равномерно распределённой поверхностной нагрузкой p :

$$\varepsilon_{fh} = \varepsilon_z = \frac{p}{E} \beta = \frac{\varepsilon_0 \beta}{(1-2\nu)} = \frac{h_f}{d_f},$$

где $\beta = \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right)$ – коэффициент бокового расширения грунта, h_f – величина морозного пучения, определяемая по результатам натурных наблюдений или в соответствии с действующими нормативными документами.

Приводимые ниже выражения для перемещений и напряжений соответствуют при $\varepsilon_0 = \text{const}$.

$$U_r = \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ b_i \left[4(1-\nu) K_1(\beta_i r) + K_0(\beta_i r) \beta_i r \right] + d_i K_1(\beta_i r) \beta_i \right\} \cos(\beta_i z);$$

$$\begin{aligned}
 U_z &= \sum_{i=1}^{\infty} \{b_i K_1(\beta_i r) \beta_i r + d_i K_0(\beta_i r) \beta_i\} \sin(\beta_i z) + C_{01} z; \\
 \frac{\sigma_z}{2G} &= \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ b_i \left[K_i(\beta_i r) \beta_i^2 r - K_0(\beta_i r) 2\nu \beta_i \right] + d_i K_0(\beta_i r) \beta_i^2 \right\} \cos(\beta_i z) + C_{01} \frac{1-\nu}{1-2\nu}; \\
 \frac{\sigma_r}{2G} &= \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ b_i \left[K_0(\beta_i r) \beta_i (3-2\nu) - K_1(\beta_i r) \left(\beta_i^2 r + 4(1-\nu) \frac{1}{r} \right) \right] + \right. \\
 &\quad \left. + d_i \left[-K_1(\beta_i r) \beta_i \frac{1}{r} - K_0(\beta_i r) \beta_i^2 \right] \right\} \times \cos(\beta_i z) + C_{01} \frac{\nu}{1-2\nu}; \\
 \frac{\sigma_\theta}{2G} &= \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ b_i \left[K_1(\beta_i r) 4(1-\nu) \frac{1}{r} + K_0(\beta_i r) (1-2\nu) \beta_i \right] + \right. \\
 &\quad \left. + d_i K_1(\beta_i r) \beta_i \frac{1}{r} \right\} \cos(\beta_i z) + C_{01} \frac{\nu}{1-2\nu}; \\
 \frac{\tau_{rz}}{2G} &= \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ b_i \left[-K_0(\beta_i r) \beta_i 2(1-\nu) \right] - d_i K_1(\beta_i r) \beta_i^2 \right\} \sin(\beta_i z).
 \end{aligned}$$

Рассмотрим цилиндрическую сваю радиусом R , длиной l (рисунок) [3]. Глубина промерзания – d_f , подъем свободной поверхности грунта – h_f .

Рис. Расчетная схема

Смягчим условия на поверхности Γ_2 , допустив, что равенство нулю σ_z^* на Γ_2 выполняется приближенно, и в окрестности линии пересечения поверхностей Γ_2 и Γ_1 возможно отличие σ_z^* от нуля $\left(\lim_{r \rightarrow \infty} \sigma_z^* = 0; \tau_{rz} = 0\right)$. Тогда, принимая

$$\beta_i = \frac{\pi i}{d_f},$$

можно удовлетворить условиям на поверхностях $\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$. При этом учитывается, что на свободной поверхности грунта $U_z(r, d_f) = h_f$, тогда

$$C_{01} = \frac{h_f}{d_f}.$$

Действующие на сваю сила морозного пучения F_z^0 и погонная (по периметру) нормальная сила F_n определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} F_z^0 &= -2\pi R \int_0^{d_f} \tau_{rz} dz = 2\pi R \cdot 2G \times \\ &\times \sum_{i=1,3,5,\dots} \left\{ b_i \beta_i \left[K_0(\beta_i r) \beta_i r + K_1(\beta_i r) 2(1-\nu) \right] + d_i^* \beta_i K_1(\beta_i r) \right\} \frac{2d_f}{\pi_i}, \\ F_n &= \int_0^{d_f} \sigma_r^* dz = \int_0^{d_f} \sigma_r dz - d_f p = -2GC_{01}d_f = -2G \frac{h_f}{d_f} \cdot d_f = -2Gh_f. \end{aligned}$$

Для двуконусной сваи, принимая во внимание конструктивно обусловленную малость величин углов сбег конусов, расчет сил морозного пучения проводят как для цилиндрической сваи при среднем по глубине промерзания d_f радиусе сваи R_{cp} .

Опираясь на данные экспериментальных исследований, полагаем, что в процессе подъема сваи на величину h_z , действующая на неё выталкивающая сила морозного пучения уменьшается прямо пропорционально величине относительного подъема h_z/h_f . Тогда установившаяся величина подъёма двуконусной сваи h_c при морозном пучении определяется выражением

$$h_c = h_f^{\text{np}} \left[1 - \frac{N + G + F_n \cdot 2\pi R \cdot \text{tg}\alpha + f_{\text{cp}} \cdot u(l - d_f)}{F_z} \right],$$

где h_c – подъем сваи; h_f – подъем свободной поверхности грунта; N – нагрузка на сваю, кН; G – вес сваи, кН; f_{cp} – расчетное сопротивление грунта основания на боковой поверхности сваи, кН/м²; u – периметр сваи, м; l – длина сваи, м; α – угол сбега верхнего конуса, рад.

Осевая сила, вызываемая морозным пучением и препятствующая подъёму двуконусной сваи:

$$P_n = 2\pi R_{\text{cp}} \cdot 2Gh_f \cdot \text{tg}\alpha.$$

Заметим, что препятствующая подъёму сваи сила P_n , создаваемая нормальным давлением F_n , одновременно снижает на величину P_n несущую способность двуконусной сваи в зимних условиях.

При выводе вышеприведенных соотношений предполагалось, что деформация фазовых превращений есть величина постоянная, т.е. $\varepsilon_0 = \text{const}$. При таком предположении величина подъема последовательных, начиная с глубины промерзания, слоев грунта должна линейно возрастать. Однако это противоречит экспериментальным данным, поэтому необходимо использовать некоторое осредненное значение величины деформации фазового превращения $\varepsilon_0^{\text{cp}}$.

Предположим, что ε_0 изменяется по глубине z линейно. В этом случае среднее значение деформации фазовых превращений определится следующим образом:

$$\varepsilon_0^{\text{cp}} = \frac{1}{2} \frac{(1 - 2\nu)}{\beta} \cdot \frac{h_f}{d_f}.$$

Очевидно, то же самое получим, если при вычислении ε_0 вместо h_f ввести понятие приведенной величины морозного пучения:

$$h_f^{\text{np.1}} = \frac{h_f}{2}.$$

Опираясь на экспериментальные данные, предположим, что касательные силы морозного пучения по боковой поверхности цилиндрической сваи распределены приблизительно по треугольному закону, отклоняясь от него лишь в ε -окрестности границы с поверхностью

(в соответствии с рис. 1). Это предположение позволяет «просуммировать» ряд для F_z^0 , и выражение для силы морозного пучения принимает вид:

$$F_z^0 = 8RGd_f \left\{ b\beta [K_0 \cdot R\beta + K_1 \cdot 2(1-\nu)] + d\beta \cdot K_1 \right\} \cdot \frac{\pi^2}{8}.$$

При переходе от цилиндрической сваи к двуконусной имеет место качественное скачкообразное изменение характера напряженного состояния в окрестности угловой линии, образованной поверхностями Γ_1 и Γ_2 . При дальнейшем увеличении угла сбega верхнего конуса сваи характер напряженно-деформированного состояния качественно не меняется, изменяясь лишь количественно.

Максимальный возможный процент снижения сил морозного пучения есть отношение первого слагаемого ряда для τ_{rz} к сумме всего ряда (записанного для цилиндрической сваи). Вычисления показывают, что при варьировании угла сбega верхнего конуса до 5° силы морозного пучения уменьшаются не более чем на 40 %.

Предлагаемый инженерный метод показывает удовлетворительную степень достоверности прогнозируемого подъема двуконусных свай. Относительная разность экспериментальных и расчетных данных составляет от 16,5 до 25,0 %. За зимний период 2004–2005 гг. средний подъем двуконусных свай составил 10,5 мм ($F_z^0 = 265$ кН), по предлагаемому методу подъем составит 12,6 мм, что показывает погрешность 16,5 %. Соответственно, за зимний период 2005–2006 гг. экспериментальный подъём – 13,0 мм ($F_z^0 = 240$ кН), расчетный подъем – 17,5 мм, что показывает погрешность 25 % [4, 5].

Для правильной оценки сил морозного выпучивания свай необходимо от условий полного прилипания на грани Γ_1 перейти к условиям скольжения грунта по свае:

$$U_\alpha = 0; \tau_\alpha = \tau_s,$$

где τ_s – предельное значение сцепления грунта с поверхностью сваи (где τ_s – меньшее из двух сцеплений «непучинистый грунт – свая» или «непучинистый грунт – пучинистый грунт»); U_α – смещение грунта, нормальное к поверхности сваи.

При этом сила морозного пучения определяется следующим образом:

$$F_z^0 = 2\pi R_{\text{ср}}^2 \cdot d_f \cdot \tau_s.$$

Практически этого можно добиться, создавая между верхней конической частью сваи и естественным грунтом прослойку из рыхлого непучинистого грунта (например, песка), заполняя им щель, образующуюся при забивке сваи между верхним конусом и грунтом.

При создании между верхней конической частью сваи и естественным грунтом прослойки из песчано-гравийной смеси средний подъем двуконусной сваи за зимний период 2004–2005 гг. составил 0 мм ($F_z^0 = 0,9$ кН), за зимний период 2005–2006 гг. – 0,9 мм ($F_z^0 = 0,7$ кН).

Библиографический список

1. Репецкий, Д.С., Юшков Б.С., Добрынин А.О. Новая конструкция сваи для сезоннопромерзающих глинистых грунтов // XXIV Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 80-летию со дня рождения академика В.П. Макеева: крат. сообщения / РАН УрО и др. – Екатеринбург, 2004. – С. 345–352.
2. Репецкий Д.С., Юшков Б.С., Добрынин А.О. Виды свай для сезоннопромерзающих грунтов // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог: материалы науч.-техн. конф. – Пермь, 2004. – С. 20–26.
3. Юшков Б.С., Добрынин А.О., Репецкий Д.С. Конструкции свай для сезоннопромерзающих глинистых грунтов // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации фундаментов, мостов и автомобильных дорог. Механизация строительства. Охрана окружающей среды: Материалы науч.-техн. конф. – Пермь, 2004. – С. 3–9.
4. Репецкий Д.С., Юшков Б.С., Добрынин А.О. Новая конструкция сваи для водонасыщенных глинистых грунтов // Геотехнические проблемы строительства крупномасштабных и уникальных объектов: тр. междунар. геотехн. конф. – Алматы, 2004. – С. 729–732.
5. Репецкий Д.С., Юшков Б.С. Устройство опор линий электропередач на сезоннопромерзающих грунтах // Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог. Охрана окружа-

ющей среды: материалы 3-й Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пермь, 2005. – С. 68–77.

References

1. Yushkov B.S., Dobrynin S.A., Repetskii D.S. Novaya konstruktsiya svai dlya sezonopromerzayushchikh glinistyx gruntov [New design of the piles for casinopokernews clay soils]. *XXIV Russian school on problems of science and technology, devoted to the 80 anniversary from the birthday of academician VP Makeyev*. Ekaterinburg, 2004, pp. 345-352.

2. Yushkov B.S., Dobrynin S.A., Repetskii D.S. Vidy svaj dlya sezonopromerzayushchikh gruntov [Types of piles for casinopokernews soil]. *Materials of the scientific - technology Conference "Problems of design, construction and operation of motor roads"*. Perm, 2004, pp. 20-26.

3. Yushkov B.S., Dobrynin S.A., Repetskij D.S. Konstruktsii svay dlya sezonopromerzayushchikh glinistyx gruntov [Design works for casinopokernews clay soils]. *Materials of the scientific-technology Conference "Problems of design, construction and operation of foundations, bridges and automobile roads. Mechanization of construction. Environmental protection"*. Perm, 2004, pp. 3-9.

4. Yushkov B.S., Dobrynin S.A., Repetskaij D.S. Novaya konstruktsiya svai dlya vodonasyshchennykh glinistyx gruntov [New design of the piles for the saturated clay soils]. *Trudy mezhdunarodnoj geotekhnicheskoy konferentsii "Geotechnical problems of construction of large-scale and unique objects"*. Almaty, 2004, pp. 729-732.

5. Yushkov B.S., Repetskaij D.S. Ustroystvo opor liniy elektroperedach na sezonopromerzayushchikh gruntakh [Construction of transmission towers on clay soils susceptible to seasonable frost]. *Materials of the 3rd all-Russian. nauch.-the technology. Conf. young scientists, postgraduates and students "Problems of design, construction and operation of motor roads. Environmental protection"*. Perm, 2005, pp. 68-77.

Об авторах

Юшков Борис Семенович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги и мосты» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Репецкий Дмитрий Станиславович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, начальник Управления образовательных программ Пермского национального исследовательского политехнического университета (e-mail: repetsky@pstu.ru).

About the authors

Yushkov Boris Semenovich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Head of Department of Highways and bridges, Perm National Research Polytechnic University.

Repetskii Dmitry Stanislavovich (Perm, Russian Federation) – Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor, Head of educational programs, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: repetsky@pstu.ru).

Получено 01.04.2014