

УДК 624.131.435

Пойта П.С., Тарасевич А.Н.

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Одной из наиболее актуальных проблем при проектировании и строительстве оснований и фундаментов является уменьшение величины неравномерных осадок. Неучет этого фактора в ряде случаев приводит к значительным неоправданным затратам, в полной мере не обеспечивающим нормальную эксплуатацию здания. Нами предлагается весьма простой и эффективный подход к проектированию оснований и фундаментов, в значительной степени снижающий развитие неравномерных осадок, а, следовательно, позволяющий существенно повысить экономичность проектных решений.

Весьма прогрессивной технологией подготовки оснований является интенсивное ударное уплотнение грунтов тяжелыми трамбовками. Зарубежный опыт применения этой технологии свидетельствует, что в сравнении с устройством свайных фундаментов отношение затрат оценивается как 1/7. При уплотнении значительных по площади (более 10 тыс. м²) и мощных грунтовых толщ затраты на уплотнение составляют 1/15 по сравнению с затратами на устройство свайного основания [1].

По сравнению с такими методами, как статическая пригрузка основания, замена слабых грунтов, устройство свайных фундаментов и др., помимо прямого сокращения затрат, достигается дополнительный эффект за счет сокращения сроков строительства [2, 3]. Как отмечают Ю.К.Зарецкий и М.Ю.Гарицелов, стоимость работ по интенсивному ударному уплотнению оснований в несколько раз ниже стоимости применения любого другого метода подготовки основания при залегании слабых грунтов на глубину более 4,0 м [4].

Реализация комплексного подхода к проектированию и строительству оснований и фундаментов еще в большей степени улучшает показатели экономической эффективности.

В работе [5] предложен метод расчета самонапряженной плиты на упругом основании с усилиями в срединной плоскости. Дифференциальное уравнение изгиба срединной поверхности плиты с учетом действующих в срединной плоскости усилий имеет вид:

$$D \left[\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right] + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = q(x, y) - p(x, y), \quad (1)$$

где D — цилиндрическая жесткость плиты;
 $w(x, y)$ — прогиб плиты;
 N_x, N_y, N_{xy} — погонные усилия, приложенные в срединной плоскости;
 $q(x, y)$ — внешняя нагрузка, перпендикулярная срединной плоскости;
 $p(x, y)$ — реактивное давление грунта.

Запишем уравнение, выражающее зависимость между давлением на основание и перемещением поверхности основания в виде:

$$w^*(x, y) = \iint_F P(\xi, \eta) K(x, y, \xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (2)$$

где: $w^*(x, y)$ — осадка поверхности основания;
 $K(x, y, \xi, \eta)$ — ядро основания, т.е. прогиб основания в точке (x, y) от единичной силы, приложенной в точке (ξ, η) ;
 ξ, η — координаты точки приложения силы;
 x, y — координаты точки, где определяется перемещение.

Граничные условия на свободных краях плиты запишутся следующими выражениями:

при $x = 0$ и $x = a$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0; \quad (3)$$

$$Q_x + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = 0; \quad (4)$$

при $y = 0$ и $y = b$

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0; \quad (5)$$

$$Q_y + \frac{\partial M_{yx}}{\partial x} = 0; \quad (6)$$

где:

$$M_{xy} = M_{yx} = -D(1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y};$$

$$Q_x = -D \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right);$$

$$Q_y = -D \left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right).$$

Для решения системы дифференциальных уравнений при заданных граничных условиях используем метод конечных разностей. Заменяя частные производные конечными разностями, вместо дифференциальных, следует решать систему алгебраических уравнений. Разделив поверхность рассматриваемой плиты линиями, параллельными осям принятой прямоугольной системы координат с шагом Δx и Δy , и обозначив ординаты срединной поверхности плиты на пересечении двух линий через $W_{i,k}$, получим.

Для первых производных

$$\frac{\partial w_{i,k}}{\partial x} = \frac{w_{i+1,k} - w_{i-1,k}}{2\Delta x};$$

$$\frac{\partial w_{i,k}}{\partial y} = \frac{w_{i,k+1} - w_{i,k-1}}{2\Delta y}.$$

Для вторых производных

$$\frac{\partial^2 w_{i,k}}{\partial x^2} = \frac{w_{i+1,k} - 2w_{i,k} + w_{i-1,k}}{\Delta x^2};$$

$$\frac{\partial^2 w_{i,k}}{\partial y^2} = \frac{w_{i,k+1} - 2w_{i,k} + w_{i,k-1}}{\Delta y^2};$$

$$\frac{\partial^2 w_{i,k}}{\partial y \partial x} = \frac{w_{i-1,k-1} - w_{i-1,k+1} - w_{i+1,k-1} + w_{i+1,k+1}}{4\Delta x \Delta y}.$$

Для третьих производных

$$\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = \frac{-w_{i-2,k} + 2w_{i-1,k} - 2w_{i+1,k} + w_{i+2,k}}{2\Delta x^3};$$

$$\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} = \frac{-w_{i,k-2} + 2w_{i,k-1} - 2w_{i,k+1} + w_{i,k+2}}{2\Delta y^3};$$

$$\frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} = \frac{-w_{i-1,k-1} + w_{i-1,k+1} - 2w_{i,k-1} - 2w_{i,k+1} - w_{i+1,k-1} + w_{i+1,k+1}}{2\Delta x^2 \Delta y};$$

$$\frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} = \frac{-w_{i-1,k-1} + w_{i-1,k} - w_{i-1,k+1} + w_{i+1,k-1} - 2w_{i+1,k} + w_{i+1,k+1}}{2\Delta x \Delta y^2}.$$

Для четвертых производных

$$\frac{\partial^4 w_{i,k}}{\partial x^4} = \frac{w_{i-2,k} - 4w_{i-1,k} + 6w_{i,k} - 4w_{i+1,k} + w_{i+2,k}}{\Delta x^4};$$

$$\frac{\partial^4 w_{i,k}}{\partial y^4} = \frac{w_{i,k-2} - 4w_{i,k-1} + 6w_{i,k} - 4w_{i,k+1} + w_{i,k+2}}{\Delta y^4};$$

$$\frac{\partial^4 w_{i,k}}{\partial x^2 \partial y^2} = \frac{w_{i-1,k-1} - 2w_{i-1,k} + w_{i-1,k+1} - 2w_{i,k-1} + 4w_{i,k} - 2w_{i,k+1} + w_{i+1,k-1} - 2w_{i+1,k} + w_{i+1,k+1}}{\Delta x^2 \Delta y^2}$$

Подставляя в дифференциальное уравнение (1) соответствующие разностные отношения получим следующее разностное уравнение:

$$\begin{aligned} D \left\{ \frac{w_{i-2,k} - 4w_{i-1,k} + 6w_{i,k} - 4w_{i+1,k} + w_{i+2,k}}{\Delta x^4} + \right. \\ \left. + \frac{2}{\Delta x^2 \Delta y^2} [4w_{i,k} - 2(w_{i-1,k} + w_{i,k-1} + w_{i+1,k} + w_{i,k+1}) + \right. \\ \left. + w_{i-1,k-1} + w_{i-1,k+1} + w_{i+1,k-1} + 2w_{i+1,k+1}] + \right. \\ \left. + \frac{w_{i,k-2} - 4w_{i,k-1} + 6w_{i,k} - 4w_{i,k+1} + w_{i,k+2}}{\Delta y^4} \right\} + N_x \frac{w_{i+1,k} - 2w_{i,k} + w_{i-1,k}}{\Delta x^2} + \\ + N_y \frac{w_{i,k+1} - 2w_{i,k} + w_{i,k-1}}{\Delta y^2} + N_{xy} \frac{w_{i-1,k-1} - w_{i-1,k+1} - w_{i+1,k-1} + w_{i+1,k+1}}{2\Delta x \Delta y} = \\ = q(x, y) - p(x, y) \end{aligned} \quad (7)$$

Решая совместно уравнения изгиба плиты, записанные для точки (i, k) , и уравнения граничных условий для изгибающих моментов, крутящих моментов и приведенных поперечных сил получим выражение для $w_{i,k}$, содержащее только прогибы точек плиты

$$\begin{aligned} \frac{(2-2\nu)}{a^4} w_{i,k-2} + \frac{4(\nu-1)(1+2\lambda^2+\nu)}{\lambda^4} w_{i,k-1} + \frac{2(1+\lambda^4-4\lambda^2(\nu-1)-2\nu^2)}{\lambda^4} w_{i,k} - \\ - \frac{8(\nu-1)}{\lambda^2} w_{i+1,k-1} + \frac{4(2\lambda^2(\nu-1)-\lambda^4-\nu^2)}{\lambda^4} w_{i+1,k} + 2 \left(2 - \frac{2\nu^2}{\lambda^4} \right) w_{i+2,k} = \\ = \frac{\Delta x^4}{4D} [q(x, y) - p(x, y)] \end{aligned}$$

где $\lambda = \frac{\Delta y}{\Delta x}$; $\alpha = N_x \Delta x^2$; $\beta = N_y \Delta x^2$.

В матричной форме система уравнений для определения перемещений узлов сетки плиты и реактивных давлений в контактной зоне записывается в следующем виде:

$$[K] \vec{X} = \vec{P} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \vec{X} &= [w_1, w_2, \dots, w_n, p_1, p_2, \dots, p_n] \\ \vec{P} &= [q_1, q_2, \dots, q_n, 0, 0, \dots, 0] \end{aligned}$$

где: $[K]$ – матрица жесткостей и совместности деформаций;

X – вектор неизвестных перемещений и реактивных давлений;

P – вектор внешней нагрузки, которая на участке принимается постоянной.

После решения системы уравнений по известным прогибам плиты определяются усилия в плите (изгибающие моменты и поперечные силы).

Используя полученную эпюру перемещений, можно корректировать деформационные характеристики основания. С целью выравнивания осадок плиты необходимо выполнить локальное уплотнение грунтов оснований. Для решения этой задачи следует использовать метод уплотнения грунтов тяжелыми трамбовками. Достоинством применения данного метода является то, что уплотнение грунтов можно проводить до фиксированного значения модуля деформации при заданных технологических параметрах, энергии удара, исходной и требуемой плотности грунта. Требуемый диаметр трамбовки следует определять по формуле

$$d = \frac{0,255MqH(1 - v^2)\omega}{\left(\frac{\rho_d^{тр} - \rho_d \cdot l}{\rho_d^{тр}}\right)^2 E}$$

- где $\rho_d^{тр}$ – требуемая плотность сухого грунта, т/м³;
 ρ_d – плотность сухого грунта до уплотнения, т/м³;
 l – мощность уплотненного слоя, м;
 v – коэффициент относительной поперечной деформации;
 ω – безразмерный коэффициент, равный 0,79 для круглой в плане трамбовки;
 E – модуль деформации грунта природного сложения, МПа;
 M – масса трамбовки, т;
 H – высота сбрасывания, м.

Технологическую схему уплотнения грунтов следует принимать в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [6].

Прогнозируемые значения угла внутреннего трения и модуля деформации следует определять по методике, приведенной в работе [7]. Достоинством этого подхода является то, что прогнозируемые характеристики грунта могут быть определены с учетом упрочнения оснований во времени. Предлагаемая методика позволяет учесть временной фактор непосредственно на начало строительства объекта.

Следует отметить, что предложенный метод проектирования оснований апробирован на строительстве многоэтажного жилого дома в г. Минске. Неоднородность основания устранена методом интенсивного ударного уплотнения, что обеспечило разность осадок в допустимых пределах при существенном уменьшении материалоемкости фундаментов, в результате чего получен значительный экономический эффект.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарецкий Ю.К., Гарицелов М.Ю. Глубинное уплотнение грунтов ударными нагрузками. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
2. Винокуров Е.Ф., Макарук П.Н., Пойта П.С., Набоков И.М., Лобанов В.В. Применение метода интенсивного динамического уплотнения грунта в Белорусской ССР. – Минск, 1989. – с. 60-68.
3. Ганичев И.А. Устройство искусственных оснований и фундаментов. – М.: Стройиздат, 1981. – 543 с.
4. Зарецкий Ю.К., Вуцель В.И., Гарицелов М.Ю., Березинский С.А. Интенсивное динамическое уплотнение слабых грунтовых оснований // Энергетическое строительство. – 1983. - № 10. – с. 37-40.
5. Тарасевич А.Н., Пойта П.С. Самонапряженные плиты на упругом основании // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовка инженерных кадров Республики Беларусь: Сб. статей VII научно-методического межвузовского семинара. – Брест, 1997. – с. 136-141.
6. Пойта П.С. Влияние физико-механических свойств уплотняемого грунта на оптимальный диаметр трамбовки // Строительство. Минск. – 2003. - № 1-2. – с. 243-247.
7. Пойта П.С. Строительные свойства искусственных оснований. – Брест: издательство БГТУ. – 2004. – 174 с.