

**МОНОЛИТНЫЕ И СБОРНО-МОНОЛИТНЫЕ
ФУНДАМЕНТЫ, КАК СИСТЕМА ПЕРЕКРЕСТНЫХ
БАЛОК, ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ГРУНТОВЫХ
УСЛОВИЯХ**

Семенюк С.Д.

Белорусско-Российский университет
г. Могилев, Республика Беларусь

АНОТАЦІЯ: У статті приведені конструкційно-технологічні основи залізобетонних фундаментів як системи перехресних балок. Приведена розрахункова модель і метод рішення, побудована функція Гріна для пружної клиновидної основи і для системи перехресних балок із защемленою точкою.

АННОТАЦИЯ: В статье даны конструкционно-технологические основы железобетонных фундаментов как системы перекрестных балок. Приведена расчетная модель и метод решения, построена функция Грина для упругого клиновидного основания и для системы перекрестных балок с защемленной точкой.

ABSTRACT: In article uses constructional and technological bases of the steel concrete bases as systems of cross beams are this. The settlement model and a decision method is given, Green's function for the elastic wedge-shaped basis and for system, cross beams with the jammed point is constructed.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Сборно-монолитный фундамент, система перекрестных балок, защемленная точка.

ВВЕДЕНИЕ

К категориям сложных грунтовых условий относят территории, где в результате развития деформационных или динамических процессов в

грунтах возникает опасность повреждения или разрушения зданий и сооружений [1].

Примеры деформаций зданий и сооружений, вызванных недооценкой сложных грунтовых условий строительства, приведены в многочисленных публикациях отечественных и зарубежных авторов. При анализе этих примеров обнаруживается соответствие форм деформаций зданий и сооружений, построенных в разнообразных условиях. Независимо от причин приводящих к деформации грунтов, все виды воздействий со стороны оснований на здание сводятся к неравномерным вертикальным и горизонтальным перемещениям оснований.

Следствием неравномерных вертикальных перемещений основания являются наблюдаемые крены сооружения, различные формы деформаций изгиба, сдвига и кручения. Деформации эти проявляются как в чистом виде, так и в различных сочетаниях: кручение с изгибом, крен с изгибом, сжатие с кручением и т.п. Неравномерные горизонтальные перемещения основания оказывают воздействие на подземные части сооружений в виде сдвигающих сил по боковым поверхностям и подошве фундамента, а также в результате нормального давления сдвигающего грунта на лобовые поверхности фундаментов. Исходя из вышесказанного необходимо уточнить методику расчета пространственных сечений железобетонных фундаментных балок подверженных кручению с изгибом и продольной силой.

Для совершенствования решения контактной задачи, «система перекрестных балок - основание», целесообразно учитывать реологические свойства грунтов, в частности – ползучесть. Для описания процессов ползучести можно использовать теорию наследственной ползучести, позволяющей получить уравнения деформирования в соответствии с опытными данными для конкретного грунта. Важным вопросом этого направления исследований является деформирование и разрушение железобетонных балочных систем при деформационных воздействиях в запредельных состояниях [6].

КОНСТРУКЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТОВ КАК СИСТЕМЫ ПЕРЕКРЕСТНЫХ БАЛОК

При проектировании зданий и сооружений в сложных грунтовых условиях необходимо предусматривать меры, обеспечивающие требуемые эксплуатационные качества и долговечность сооружений. Это достигается либо путем создания надежного основания, либо применением специальных конструкций сооружений, приспособленным к

повышенным неравномерным деформациям. К таким специальным конструкциям относятся железобетонные фундаменты, использование которых целесообразно в монолитном или сборно-монолитном железобетоне. На рис. 1 представлен монолитный железобетонный фундамент в виде системы перекрестных балок с жестким сопряжением в узлах. На рис. 2 представлен сборно-монолитный фундамент в виде системы перекрестных балок с жестким сопряжением в узлах на упругом клиновидном основании. В [2, 3, 5] показана детализовка сопряжений перекрестных балок и даны конструктивно – технологические основы железобетонных фундаментов как система перекрестных балок.

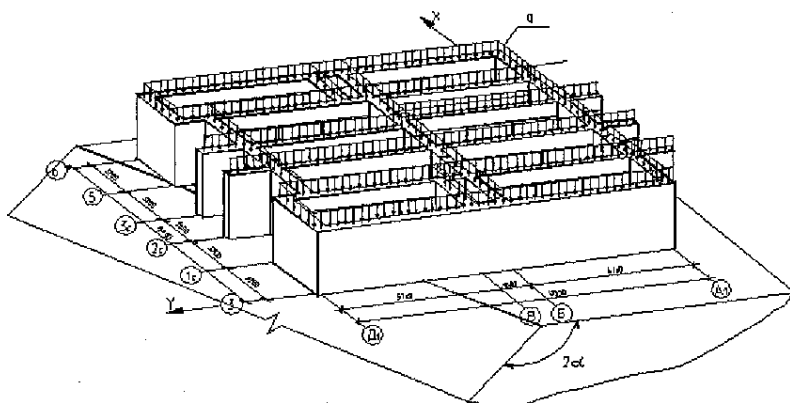


Рис. 1. Монолитный железобетонный фундамент в виде системы перекрестных балок на упругом клиновидном основании

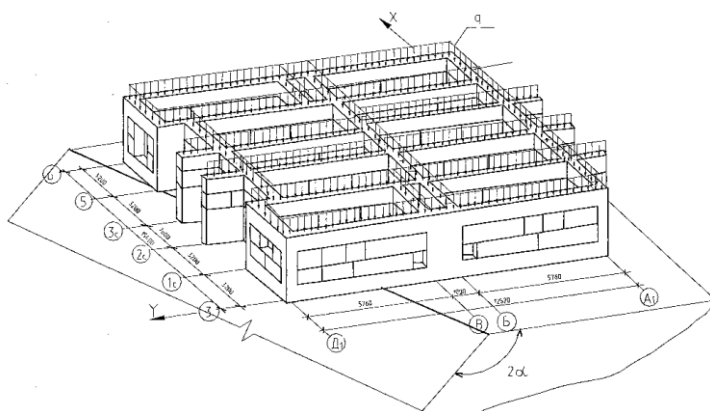


Рис. 2. Сборно-монолитный железобетонный фундамент в виде системы перекрестных балок на упругом клиновидном основании

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Расчетные схемы фундаментов под жилые и гражданские здания обычно представляют в виде системы перекрестных балок на упругом основании. При этом расчет осуществляют в предположении шарнирного сопряжения балок, что не соответствует реальной работе системы и требует существенного уточнения [4]. В [5] используя комплексный подход, объединивший расчетные положения теории линейно-деформируемой среды и данные экспериментальных исследований, автор предлагает теоретический метод расчета железобетонных фундаментов из перекрестных балок с жесткими сопряжениями в узлах, позволяющий в любом месте контакта подошвы фундамента и основания численно определить перемещение, реактивный отпор основания, значения изгибающих моментов, поперечных сил и крутящих моментов.

За расчетную модель рассматриваемого фундамента в аварийном состоянии принята система перекрестных балок с жесткими узлами на упругом клиновидном основании, при этом большая часть подошвы пространственного фундамента находится в контакте с гранью клина, у меньшей части - контакт отсутствует. Угол раствора клина -2α может изменяться от $0,5\pi$ до π . Рассмотрены основные возможные случаи расположения фундаментов на деформированном основании и предложен метод решения.

Расчет ведем способом Б.Н. Жемочкина, при этом принимаем, что реактивные касательные давления в контактной зоне стержней не учитываются; распределение нормальных реактивных давлений по ширине каждого стержня - постоянно. Считаем, что усилие в каждой связи вызывает равномерное распределение реактивных давлений в пределах участка. Полученную многократно статически неопределимую систему рассчитываем смешанным методом строительной механики, приняв за неизвестные усилия в связях Б.Н. Жемочкина, линейные и угловые перемещения введенного защемления на краю системы перекрестных балок (рис. 3) [7].

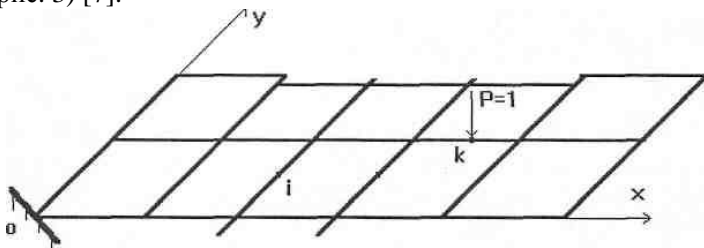


Рис. 3. Основная система смешанного метода

Разбив систему перекрестных балок на N участков, составляем систему канонических уравнений способа Б.Н. Жемочкина для нахождения неизвестных. Система канонических уравнений для нахождения неизвестных имеет вид:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \delta_{ik} \cdot X_k + u_0 + \varphi_{0x} \cdot y_i + \varphi_{0y} \cdot x_i + \Delta_{ip} &= 0 \\ - \sum_{k=1}^N X_k \cdot y_k + M_{px} &= 0 \\ - \sum_{k=1}^N X_k \cdot x_k + M_{py} &= 0 \\ - \sum_{k=1}^N X_k + R &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициенты при неизвестных усилиях в связях Б.Н. Жемочкина δ_{ik} зависят от осадок упругого основания W_{ik} и прогибов основной системы Z_{ik} и равны:

$$\begin{aligned} \delta_{ik} &= W_{ik} + Z_{ik} \\ W_{ik} &= \frac{1-\nu_0^2}{\pi \cdot E_0 \cdot h} (F_{ik}^0 + F_{ik}^1) \end{aligned} \quad (2)$$

где W_{ik} - перемещение центра участка Б.Н. Жемочкина с номером i на поверхности упругого основания от действия единичной силы, распределенной по участку с номером k ;

E_0, ν_0, h - модуль деформации, коэффициент Пуассона и линейный размер (например, толщина слоя) для упругого основания.

F_{ik}^0 - характеризует осадку упругого однородного изотропного полупространства;

F_{ik}^1 - корректирует F_{ik}^0 для данной модели упругого основания.

ФУНКЦИЯ ГРИНА ДЛЯ УПРУГОГО КЛИНОВИДНОГО ОСНОВАНИЯ

Как показано в [5], вертикальные перемещения нагруженной грани упругого пространственного клина от действия нормальной сосредоточенной силы с достаточной инженерной точностью в цилиндрической системе координат определяется выражением

$$V_{(r,z)} = \frac{P}{2\pi \cdot E_0} \frac{1-\nu_0^2}{ar} \int_0^\infty L \alpha, \tau P_{\frac{1}{2}+i\tau} ch\mu \, d\tau. \quad (3)$$

Выражение для осадок поверхности упругого клиновидного основания получено в следующем виде:

$$V_{(r,z)} = \frac{P}{\pi \cdot E} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{A_0}{2R_2} \right), \quad (4)$$

где

$$R_1 = \sqrt{(\alpha - r)^2 + z^2}, \quad (5)$$

$$R_2 = \sqrt{(\alpha - r)^2 + z^2}.$$

В формуле (4) первое слагаемое представляет решение Я. Буссинеска для упругого однородного изотропного полупространства.

ФУНКЦИЯ ГРИНА ДЛЯ СИСТЕМЫ ПЕРЕКРЕСТНЫХ БАЛОК С ЗАЩЕМЛЕННОЙ ТОЧКОЙ

Задачу по определению прогибов Z_{ik} предлагается решать следующим образом.

Известно, что прогибы прямолинейного стержня с защемлением в начале координат под действием сосредоточенной силы описываются дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^4 z}{dx^4} = 0, \quad (6)$$

то есть кубической параболой. На основании этого для рассматриваемой расчетной системы, с учетом кинематических граничных условий в начале координат, учитывая кручение, задаемся функцией Грина в виде тринадцатичленного полинома

$$Z_{x_1 y} = \alpha_{11} \frac{xy}{ab} + \alpha_{20} \frac{x^2}{a^2} + \alpha_{30} \frac{x^3}{a^3} + \alpha_{21} \frac{x^2 y}{a^2 b} + \alpha_{31} \frac{x^3 y}{a^3 b} + \alpha_{22} \frac{x^2 y^2}{a^2 b^2} + \alpha_{32} \frac{x^3 y^2}{a^3 b^2} + \alpha_{02} \frac{y^2}{b^2} + \alpha_{03} \frac{y^3}{b^3} + \alpha_{12} \frac{xy^2}{ab^2} + \alpha_{13} \frac{xy^3}{ab^3} + \alpha_{23} \frac{x^2 y^3}{a^2 b^3} + \alpha_{33} \frac{x^3 y^3}{a^3 b^3} \quad (7)$$

где a, b - характерные размеры системы перекрестных балок;

α_{ik} - неизвестные коэффициенты.

Постоянные α_{ik} (7) определим методом Ритца. Функционал полной энергии системы перекрестных балок с защемленной точкой под действием единичной силы, приложенной к точке с координатами x_p и y_p , имеет вид

$\Theta =$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N l_i E J_i \frac{d^2 z_{x_i y_i}}{dx^2} dx + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M l_k E J_k \frac{d^2 z_{x_k y}}{dy^2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N l_i G T_i \frac{d^2 z_{x_i y_i}}{dx dy} dx + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M l_k G T_k \frac{d^2 z_{x_k y}}{dx dy} dy - Z(x_p, y_p) \quad (8)$$

где $l_i, l_k, E J_i, G T_i, G T_k$ - длины, изгибная и крутильная жесткости стержней, образующих систему перекрестных балок;

N, M - число стержней, параллельных осям OX и OY соответственно.

В (8) суммирование распространяется по всем стержням системы, параллельным соответствующим осям координат.

После вычисления функционала (8) дифференцированием полученного выражения по каждому из неизвестных α_{ik} получаем систему линейных алгебраических уравнений 13 порядка, решение которой

позволяет определить функцию Грина для системы перекрестных балок с защемленной точкой.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА РАСЧЕТА И АНАЛИЗ РАБОТЫ ФУНДАМЕНТНЫХ БАЛОК

Вычисление функционала полной энергии и его дифференцирование по каждому из неизвестных коэффициентов a_{ik} производилось в общем виде с помощью пакета компьютерной алгебры «Matematika-3». Были составлены программы расчета системы перекрестных балок на упругом основании для основных возможных случаев эксплуатации здания. Число участков Б.Н. Жемочкина колебалось в пределах 201...280. В зависимости от характеристик основания, материала фундамента, действующей на систему вертикальной равномерно распределенной нагрузки и длительность ее действия для каждого из участков Б.Н. Жемочкина вычислялись осадки, реактивный отпор грунта, изгибающие моменты, поперечные силы и крутящие моменты. Так, численная реализация метода расчета показала, что в замкнутых системах при симметричной нагрузке для условий нормальной эксплуатации определяющими при расчете сечений бортовых балок являются крутящие моменты; при расчете сечений внутренних балок - изгибающие моменты. При расположении ребра клина диагонально пятну здания или параллельно одной из его сторон определяющим при расчете бортовых балок является совместное действие изгибающих и крутящих моментов, при этом, в сравнении с нормальными условиями эксплуатации, крутящие моменты меняют знак на противоположный. Ползучесть бетона вызывает перераспределение усилий в элементах системы: в поперечных и параллельных им бортовых балках изгибающие моменты и поперечная сила увеличиваются, крутящие моменты уменьшаются; в продольных и параллельных им бортовых балках изгибающие моменты и поперечные силы уменьшаются, крутящие моменты увеличиваются.

ПРОЧНОСТЬ СЕЧЕНИЙ ФУНДАМЕНТНЫХ БАЛОК

При действии на железобетонную балку крутящего и изгибающего моментов разрушение происходит по пространственному сечению, образованному спиральной трещиной и замыкающей ее сжатой зоной, расположенной под углом α к горизонтальной оси элемента.

Условие прочности в расчетном предельном состоянии выведено из соотношения моментов внешних и внутренних сил относительно оси,

проходящей через центр тяжести сжатой зоны. При этом, учитывая упругопластическую работу бетона, эпюру напряжений в сжатой зоне принимаем в виде прямоугольной трапеции. При симметричном армировании балки:

$$T_x \frac{C_1}{b} + \frac{1}{\chi} \leq f_{yd} A_{st} z + f_{ywd} A_{sw} \frac{z}{s} \frac{C_1^2}{2h+b} + \sigma_{sc} A_{sc} (y_{ц.т.} - c') \quad (9)$$

$$\text{где } \chi = \frac{T_x}{M_y}; Z_b = d - \frac{x(\lambda^2 + \lambda + 1)}{3(\lambda + 1)}; y_{ц.т.} = d - Z - c'; \lambda = 0,93 - 0,014 f_{cd} \quad (10)$$

Высоту сжатой зоны "x" определим из уравнения проекций всех сил, действующих в рассматриваемом пространственном сечении на нормаль к плоскости сжатой зоны:

$$0,5 f_{cd} \chi C_1^2 + b^2 (1 + \lambda) = b f_{yd} A_{st} - \sigma_{sc} A_{sc} + q_{sw} \frac{C_1^2}{2h+b} \quad (11)$$

$$\text{где } q_{sw} = \frac{f_{ywd} a_{sw}}{s}$$

В первом приближении высоту сжатой зоны можно определять из уравнения:

$$A_1 x^2 \sin^2 \alpha + A_2 x \sin \alpha + A_3 = 0, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= 0,5 (1 - \lambda^2) b \sin \alpha; \\ A_2 &= A_s \alpha - (1 - \lambda) \frac{f_{yd}}{f_{cd}}; \\ A_3 &= -\alpha A_s c'; \\ \alpha &= \frac{E_s}{E_c}; \end{aligned} \quad (13)$$

Для случая совместного действия крутящего момента и поперечной силы условие прочности элемента выводится из соотношения моментов внешних и внутренних сил относительно оси, проходящей через центр тяжести сжатой зоны балки, полученного аналогично (9).

Принимая эпюру напряжений сжатой зоны в виде прямоугольной трапеции получим:

$$T_x \frac{C_2}{h} \left(1 + \frac{1}{k} \right) \leq (f_{yt} A_{st} + f_{ywd} \frac{a_{sw}}{s} \frac{C_2^2}{2h+b}) \quad (14)$$

$$\text{где } k = \frac{T_x}{V_z b}; Z = b_0 - \frac{x(\lambda^2 + \lambda + 1)}{3(\lambda + 1)}; \lambda = 0,93 - 0,014 f_{cd}$$

T_x - крутящий момент;

V_z - и поперечная сила относительно центра тяжести сжатой зоны рассчитываемого сечения;

A_s - площадь всех продольных стержней, расположенных у грани h, растянутой от изгиба;

a_{sw} - площадь сечения одной ветви хомута;

S - расстояние между хомутами.

Высота сжатой зоны определяется из уравнения

$$0,5R_b x + \lambda x C_2^2 + h^2 = R_s A_s + R_{sw} \frac{\alpha_{sw}}{u} \frac{C_2^2}{2h+b} h. \quad (15)$$

Как и в предыдущем случае необходима проверка $\Gamma_x \leq 0,1f_{cd} b^2 h$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено решение контактной задачи для системы перекрестных балок на произвольном упругом основании с учетом кручения. Предлагаемый подход, основанный на синтезе способа Б.Н. Жемочкина и метода Ритца, позволяет рассчитывать любые системы перекрестных балок на произвольном упругом основании, разработанный автором впервые и не имеет аналогов в мировой практике.

Как частные случаи из предлагаемой методики следуют решения для упругих слоя и полупространства. Построена функция Грина для системы перекрестных балок с защемленной точкой и уточнено выражение функции Грина для упругого клиновидного основания.

Разработанная расчетная модель является иерархической системой, пригодной для прогнозирования работы пространственных фундаментов из перекрестных балок при различных условиях эксплуатации зданий и сооружений.

С учетом упруго-пластической работы бетона разработана методика определения несущей способности железобетонных фундаментных балок при совместном действии крутящего и изгибающего моментов, а также при совместном действии крутящего момента и поперечной силы. Для внутренних железобетонных балок системы из перекрестных лент, учитывая упругопластическую работу бетона, предложен расчет прочности сечений нормальных к продольной оси элемента и расчет прочности наклонных сечений.

Затрагиваются проблемы совершенствования решения контактной задачи и расчета железобетонных элементов подверженных совместному воздействию крутящего момента, изгибающего момента и продольной силы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черный Г.И. Геотехнические процессы в сложных грунтовых условиях Украины / Черный Г.И., Черный В.Г. // Світ геотехніки: додаток до міх відомого науково-технічного збірника. Будівельні конструкції: зб. наук. праць. К.: НДІБК, 2000. – Вип. 53 - С. 4-9.
2. Методика экспериментальных исследований фрагмента пространственно-рамного фундамента, работающего в сложных геологических условиях / [Метелюк А.С., Семенюк С.Д., Мазур С.Я., Бовчалюк Ф.И.] // Строительные конструкции. - К.: Будівельник, 1986. - Вип. 39. - С. 79-81.
3. Семенюк С.Д. Пространственные железобетонные фундаменты жилых и гражданских зданий в сложных инженерно-геологических условиях и их расчет / Семенюк С.Д. // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. – Минск: УП «Технопринт», 2000.- С. 460-470.
4. Горбунов–Посадов М.Н. Расчет конструкций на упругом основании / Горбунов–Посадов М.Н., Маликова Т.А., Соломин В.Н. - М.: Стройизат, 1984. – 679 с.
5. Семенюк С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании: монографія / Семенюк С.Д. - Могилев: Белорусско-Российский університет, 2003. - 269с.
6. Ключева Н.В. Деформирование и разрушение железобетонных балочных систем при деформационных воздействиях в запредельных состояниях / Ключева Н.В., Истомин С.Н. // Строительство – формирование среды жизнедеятельности. – Кн. 1. - Москва: МГСУ, 2003.- С. 40-45.
7. Семенюк С.Д. Расчет пространственных железобетонных фундаментов как системы перекрестных балок на упругом клиновидном основании / Семенюк С.Д. // Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. – Минск, 2000. –С. 114-118.

Статья поступила в редакцию 05.04.2013 г.