

УДК 624.131.524

Я.І. Червинський, к.т.н., с.н.с.

Науково-исследовательский институт строительных конструкций, г. Киев

ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВ ПРИ РАСЧЕТАХ ОСНОВАНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приведено обоснование необходимости тщательного анализа, применяемого в расчетной схеме метода конечных элементов характеристик деформативных свойств грунтов основания.

Ключевые слова: коэффициент сжимаемости, модуль деформации грунта, модуль упругости грунта.

Я.І. Червінський, к.т.н., с.н.с.

Науково-дослідницький інститут будівельних конструкцій, м. Київ

ДЕФОРМАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТІВ ПРИ РОЗРАХУНКАХ ОСНОВ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Наведено обґрунтування необхідності ретельного аналізу, застосованого у розрахунковій схемі методу скінченних елементів деформаційних характеристик властивостей грунтів основи.

Ключові слова: коефіцієнт стисливості, модуль деформації ґрунту, модуль пружності ґрунту.

Ya.I. Czerwinski, Ph.D., Senior Scientist
Scientific-Research Institute of Building Constructions, Kiev

DEFORMABILITY SOILS CHARACTERISTICS IN CALCULATIONS OF BASES BY THE FINITE ELEMENT METHOD

The substantiation of the need for careful analysis used in the computational scheme of the finite element method characteristics of deformation properties of soils the bases.

Keywords: compressibility, module soil deformation, elastic modulus of the soil.

Введение. Широкое применение программных комплексов для решения задач по определению напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований создает у проектировщиков и заказчиков проектной документации эйфорию причастия к современным высоким технологиям и, как следствие, уверенности в надежности принимаемых технических решений системы фундаментов и методов изменения геотехнических параметров грунтов основания с особыми свойствами. Это опасное заблуждение, которое приводит к печальным последствиям в виде повреждений окружающей застройки, сверхрасчетным деформациям несущей конструктивной системы зданий, материальным и финансовым потерям в процессе строительства и эксплуатации.

Проектировщику следует понимать, что результат расчета зависит не от численного метода, который реализует используемый программный комплекс, а только от расчетной модели, на которой он проводит численное моделирование объекта для исследования возможных расчетных состояний. Любой проектируемый объект будет

функционировать во времени, проходя в течение жизненного цикла изменения технических параметров (геометрии в процессе строительства; прочностных и деформативных характеристик строительных материалов конструкций с течением времени; инженерно-геологических условий основания). В процессе жизненного цикла объекта, начиная от «идеи – что-то такое красивое и большое» и заканчивая смутным подсознательным определением «завершение эксплуатации», необходимо выделить расчетные состояния модели.

Расчетное состояние – это одновременное состояние объекта, в котором он будет находиться в процессе строительства, эксплуатации, реконструкции (если это предусматривается на стадии проектирования), вывода из эксплуатации и ликвидации. Не следует путать определения «расчетное состояние» и «предельное состояние». Наиболее привычными для проектировщика являются такие расчетные состояния, как «строительный случай» и «эксплуатационный случай». Последовательность расчетных состояний описывает процесс жизненного цикла объекта. Каждое расчетное состояние модели объекта описывается набором технических параметров, являющихся его индивидуальными характеристиками.

При разработке расчетной численной модели объекта строительства условно можно выделить следующие группы параметров:

1. Геометрические параметры: местоположение сооружения с привязкой к плановому расположению на местности и существующей застройке; размеры конструктивных элементов сооружения; конструктивные решения узлов соединения конструкций между собой.
2. Силовые и деформационные воздействия.
3. Физические и механические характеристики элементов расчетной схемы.
4. Граничные условия модели.

Определение и назначение перечисленных параметров численной модели для каждого расчетного состояния является для проектировщика той основной задачей, от которой зависит требуемый от него конечный результат – обеспечение эксплуатационной надежности проектируемого сооружения.

Формирование численной модели для имитационного моделирования объекта при проектировании бессмысленно без решения задачи совместного расчета системы «сооружение – основание», а в последнее время все чаще решается задача совместного расчета системы «проектируемое сооружение – основание – существующие соседние здания». То есть контактная задача все более и более расширяется и усложняется. При ее решении важнейшим фактором является характеристика деформируемости основания.

Обзор последних источников исследований и публикаций. В общем случае можно выделить три основные группы методов совместного

расчета фундаментов и оснований: метод местных упругих деформаций; метод общих упругих деформаций; комбинированные методы.

Метод местных упругих деформаций базируется на предпосылке, что деформация основания происходит лишь в месте приложения нагрузки и реакция основания в этой точке прямо пропорциональна ее перемещению. Это всем известная модель Винклера. Метод общих упругих деформаций базируется на предпосылке, что деформации основания происходят не только в месте приложения нагрузки, а распределяются в соответствии с гипотезой упругого полупространства (решение Буссинеска) или полуплоскости (решение Фламана). Как это ни парадоксально, но основными недостатками указанных выше методов являются их основополагающие концепции: игнорирование распределительной способности основания в случае винклеровского основания и чрезмерная распределительная способность упругого полупространства. Два противоположных по своим концепциям метода дали толчок развитию комбинированных методов, в которых в базовые расчетные схемы вводятся дополнительные параметры, складывающие их недостатки.

В расчетной модели И.Я. Штаермана [1] при решении плоской задачи жесткого штампа к соответствующему решению теории упругости добавлена составляющая, учитывающая дополнительные перемещения, возникающие в результате местных деформаций поверхности основания. В расчетной модели М.М. Филоненко-Бородача [2] при решении задачи на упругом винклеровском основании добавлена однородная всесторонне растянутая мембрана (пространственная задача) или растянутая нить (плоская задача). В расчетной модели П.Л. Пастернака [3] вводятся две характеристики упругого основания, два коэффициента постели, кроме классического винклеровского, названного в модели коэффициентом сжатия, добавлен коэффициент сдвига, который учитывает сдвиговые деформации соседних участков основания при осадке. В расчетной модели Г.К. Клейна и И.И. Черкасова [4] к общим деформациям упругой среды добавляются остаточные деформации местного характера, которые характеризуются расчетными параметрами «число твердости основания» и «степень упрочнения основания», И.И. Черкасов добавил третий параметр – «коэффициент нелинейно деформируемого основания». В расчетной модели Н.П. Павлюка [5] введено понятие коэффициента жесткости основания при различных видах его деформирования, рассматриваются коэффициенты жесткости при вертикальном перемещении, сдвиге и повороте фундамента. В расчетной модели С.А. Ривкина [6] коэффициент жесткости основания при осадке фундамента корректируется параметрами, которые учитывают плотность, связность грунта, степень развития в нем пластических деформаций, схему распределения реакций основания по подошве фундамента.

Понятие «коэффициент жесткости основания» впервые введено Н.П. Павлюком при разработке общей теории колебаний фундаментов.

Согласно этой теории, сопротивления основным видам перемещений: вертикальным, сдвиговым и повороту фундамента, – пропорциональны их величинам. Эти коэффициенты пропорциональности называются коэффициентами жесткости основания. С.Н. Клепиков [7] предложил в общем случае моделировать основание в любой точке контактной поверхности с конструкцией двумя коэффициентами жесткости: $K_{сж}$ – коэффициент жесткости основания при сжатии; $K_{сд}$ – коэффициент жесткости основания при сдвиге. Такое основание обладает следующими свойствами: реактивные давления p_z , нормальные к контактной поверхности конструкции, пропорциональны перемещениям w_z в этом направлении – $p_z = K_{сж} \cdot w_z$; реактивные усилия трения p_x , касательные к контактной поверхности конструкции, пропорциональны перемещениям w_x в этом направлении – $p_x = K_{сд} \cdot w_x$. Е.Ф. Винокуров [8] предложил решение задачи взаимодействия конструкции и нелинейно упругого основания выполнять итерационными методами. Для решения нелинейной задачи используется метод переменных параметров. В процессе итераций у Е.Ф. Винокурова корректировался приведенный модуль сдвига G' и приведенный коэффициент Пуассона μ' . Алгоритм корректировки параметров зависит от принятого в расчете закона деформирования грунтов основания. Итерационный метод решения задачи расчета конструкций на податливом основании, моделируемом коэффициентами жесткости, в дальнейшем получил название метода переменных коэффициентов жесткости основания (МПКЖ). Название «метод переменных коэффициентов жесткости основания» окончательно было сформулировано С.Н. Клепиковым при решении задачи расчета зданий в сложных инженерно-геологических условиях.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Дальнейшее развитие методов решения задач расчета сооружений на податливом основании произошло после появления доступных программных комплексов, реализующих метод конечных элементов (МКЭ). Увеличение производительности ЭВМ и объема доступной памяти позволяет решать задачи большой размерности. Все чаще появляются попытки расчета сооружения на массиве грунтового основания методом конечных элементов. Можно констатировать, что начался повторный виток применения методов общих упругих деформаций для совместного расчета фундаментов и оснований, который базируется уже не на решениях упругого полупространства, а исходит из методов механики упругой среды.

Цель работы – совершенствование совместных расчетов системы «сооружение – основание». В статье приводится обоснование необходимости тщательного анализа применяемых в расчетной схеме метода конечных элементов характеристик деформативных свойств грунтов основания.

Основной материал и результаты. Основная идея метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину, в том числе перемещение, можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, которые называют конечными элементами (КЭ).

Для простоты изложения рассмотрим линейный КЭ плоской задачи упругой среды (рис. 1).

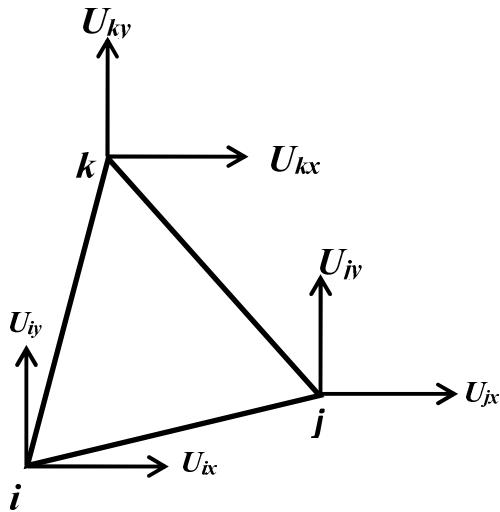


Рис. 1. Векторы перемещений линейного КЭ плоской задачи

Уравнение равновесия конечного элемента имеет следующий вид:

$$[K]^{K\mathcal{E}} \{U\} = \{F\},$$

где $[K]^{K\mathcal{E}}$ – матрица жесткости КЭ; $\{U\}$ – вектор перемещений узлов КЭ; $\{F\}$ – вектор усилий в узлах КЭ.

В развернутом виде уравнение равновесия КЭ имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} K_{ixix} & K_{ixiy} & K_{ixjx} & K_{ijy} & K_{ixkx} & K_{ixky} \\ K_{iyix} & K_{iyiy} & K_{iyjx} & K_{ijy} & K_{iykx} & K_{iyky} \\ K_{jxix} & K_{jxiy} & K_{jxjx} & K_{jxjy} & K_{jxkx} & K_{jxky} \\ K_{jyix} & K_{jyi} & K_{jyjx} & K_{jyjy} & K_{jykx} & K_{jyky} \\ K_{kxix} & K_{kxiy} & K_{kxjx} & K_{kjy} & K_{kxkx} & K_{kxky} \\ K_{kyix} & K_{kyiy} & K_{kyjx} & K_{kyjy} & K_{kykx} & K_{kyky} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{ix} \\ U_{iy} \\ U_{jx} \\ U_{jy} \\ U_{kx} \\ U_{ky} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{jx} \\ F_{jy} \\ F_{kx} \\ F_{ky} \end{Bmatrix}.$$

Отсюда следует, что усилия в каждом узле зависят от перемещений всех узлов по рассматриваемым в задаче степеням свободы, то есть

$$F_{ix} = K_{ixix} U_{ix} + K_{ixiy} U_{iy} + K_{ixjx} U_{jx} + K_{ijy} U_{jy} + K_{ixkx} U_{kx} + K_{ixky} U_{ky}.$$

Матрица жесткости КЭ для рассматриваемого случая определяется по выражению

$$[K]^{K\mathcal{E}} = [B]^T [D] [B] t A,$$

где $[B]$ – матрица градиентов; $[D]$ – матрица упругих характеристик материала КЭ; t и A – толщина и площадь КЭ.

Матрица упругих характеристик материала КЭ плоской задачи упругой среды для плоского напряженного состояния имеет вид

$$[D] = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix},$$

где E и ν – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона КЭ.

Матрица упругих характеристик материала КЭ в случае плоской деформации имеет вид

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{(1-2\nu)} & 0 \\ \frac{\nu}{(1-2\nu)} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}.$$

Деформативность конечного элемента зависит от двух параметров – модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Деформации и напряжения в конечном элементе определяются по выражениям

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U\}; \quad \{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{U\},$$

где $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}\}^T$ и $\{\sigma\} = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}\}^T$ – соответственно векторы деформации и напряжений КЭ.

Для линейных конечных элементов значения компонентов деформаций и напряжений являются величинами постоянным для всей области КЭ. Применяя программные комплексы для расчетов грунтовых оснований, следует хорошо представлять и понимать, с помощью каких конечных элементов выполняется дискретизация массива грунта в расчете.

Термин «сжимаемость грунтов» почти всегда используется при рассмотрении вопросов деформируемости грунтов. Классическое определение гласит, что сжимаемость грунтов – это их способность уменьшаться в объеме под действием внешней нагрузки. Грунт – это пористый материал, поэтому сжатие в первую очередь происходит за счет уменьшения объема пор. Наиболее часто применяемым способом определения параметров сжимаемости в лабораторных условиях являются компрессионные испытания. По результатам таких испытаний получают график зависимости изменения пористости грунта от сжимающего давления – компрессионную кривую. На рисунке 2 приведен результат компрессионных испытаний.



Рис. 2. Результаты компрессионных испытаний в одометре

На графике показаны две кривые: кривая уплотнения и кривая набухания (увеличения объема при уменьшении давления). Увеличение объема грунта при разгрузке образца характеризует упругие деформации. Разность между начальным объемом грунта и его объемом после разгрузки характеризует остаточные деформации. Выделяя диапазон изменения давления p_1 и p_2 , что соответствует точкам A и B на кривой уплотнения, определяют диапазон изменения пористости грунта. Предполагая для выделенного диапазона линейную связь между давлением и пористостью, определяют основную характеристику деформируемости – коэффициент сжимаемости грунта – по формуле

$$m_0 = \frac{(e_1 - e_2)}{(p_2 - p_1)} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Эту зависимость Н.А. Цытович [8] назвал законом уплотнения, который сформулировал следующим образом: при небольших изменениях уплотняющих давлений изменение коэффициента пористости прямо пропорционально изменению давления.

По результатам компрессионных испытаний для диапазона изменения уплотняющих давлений от p_1 до p_2 модуль общей деформации грунта определяется по формулам

$$E_0 = \frac{(1 + e_\alpha) \beta}{m_0}; \quad \beta = 1 - \frac{2 \nu^2}{(1 - \nu)}.$$

Величина β называется коэффициентом стеснения поперечной деформации, который учитывает невозможность бокового расширения образца грунта при испытаниях в одометре.

Так как «кривая уплотнения» характеризует суммарные упругие и остаточные деформации грунта, то полученное значение модуля общей деформации можно применять только для выделенного диапазона от p_1 до p_2 и только для состояния увеличения давления. В случае, когда нагрузка на основание неравномерна, следует выделять несколько расчетных диапазонов и значение модуля деформации определять для каждого отдельно.

Приведенные выше рассуждения можно использовать для «кривой набухания», которая характеризует упругую работу грунта. Получаемый при этом модуль деформации следует применять в зонах грунтового основания только для состояния уменьшения давления. При назначении модуля деформации необходимо понимать, что положение «кривой набухания» зависит от начальной точки, с которой начинается разгрузка при испытаниях.

Для оценки значений модулей деформации грунтов, особенно при условиях, что они определены только в лабораторных испытаниях, следует использовать дополнительную информацию, например результаты натурных испытаний грунтов основания сваями. При наличии результатов таких испытаний статическими вдавливающими и выдергивающими нагрузками на площадке строительства рекомендуется выполнять в предполагаемом для расчетов программном комплексе имитационное моделирование испытаний свай. Решаются обратные задачи, в которых варьируются значения модуля деформации. При моделировании испытаний выдергивающими нагрузками уточняются значения модулей деформации грунтов, которые прорезаются сваями. Затем при моделировании испытаний вдавливающими нагрузками уточняется модуль деформации грунта под нижним концом свай.

При использовании в расчетах результатов лабораторных компрессионных испытаний следует уточнять, для какого состояния грунта они выполнены, потому что при испытаниях используются образцы грунта нарушенной и ненарушенной структуры. Нужно понимать, что образец грунта «ненарушенной структуры», извлеченный с глубины 15 – 20 метров, совершенно не обладает теми свойствами, которые ему свойственны в естественных условиях залегания.

При формировании программы инженерных изысканий для определения механических характеристик грунтов необходимо предусматривать проведение полевых испытаний грунтов.

Выводы:

1. Перед применением для расчетов системы «сооружение – основание» программных комплексов, реализующих метод конечных элементов, необходимо выполнить анализ используемых в расчетных схемах типов конечных элементов. При решении двухмерных задач следует уточнить, какой вид напряженного состояния реализует формируемая расчетная схема, потому что это могут быть: плоское напряжение; плоская деформация; осесимметричная задача.

2. При подготовке расчетной схемы грунтового основания проектировщик должен руководствоваться «законом уплотнения». При анализе предполагаемой истории нагружения основания необходимо выделить в грунте зоны «увеличения напряжений» и «уменьшения напряжений». Значения модуля деформации, которые используются в

расчете, назначаются для соответствующего ему условия изменения напряжений в основании.

3. При использовании специальных программных комплексов, в которых реализованы более сложные модели грунтов, необходимо проанализировать применяемые в них параметры, характеризующие деформируемость грунтов. Не следует применять в них модуль общей деформации, если в рассматриваемых расчетных случаях возможно изменение напряженного состояния в сторону частичной разгрузки напряжений. Такие условия работы грунтов возникают при моделировании строительных расчетных состояний, связанных с разработкой котлованов и оценкой влияния этих работ на существующие здания.

Литература

1. Штаерман, И.Я. Контактная задача теории упругости / И.Я. Штаерман. – М. – Л.: Гостехиздат, 1949. – 270 с.
2. Филоненко-Бородич, М.М. Некоторые приближенные теории упругого основания / М.М. Филоненко-Бородич // Ученые записки МГУ. – Вып. 46. Механика. – М.: Изд. МГУ, 1940. – С. 3 – 18.
3. Пастернак, П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели / П.Л. Пастернак. – М.: Стройиздат, 1954. – 56 с.
4. Черкасов, И.И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве / И.И. Черкасов. – М.: Транспорт, 1976. – 247 с.
5. Савинов, О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет / О.А. Савинов. –2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, 1979. – 200 с.
6. Ривкин, С.А. Методические указания и пример расчета фундаментной плиты / С.А. Ривкин. – К.: КИСИ, 1976. – 50 с.
7. Клепиков, С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / С.Н. Клепиков. – К.: НИИСК, 1996. – 202 с.
8. Цытович Н.А. Механика грунтов. Издание четвертое / Н.А. Цытович. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. – 636 с.

Надійшла до редакції 17.10.2013

© Я.И. Червинский