

№3, 2000

Расчет фундаментных плит в пространственной постановке с учетом нелинейных деформаций основания.

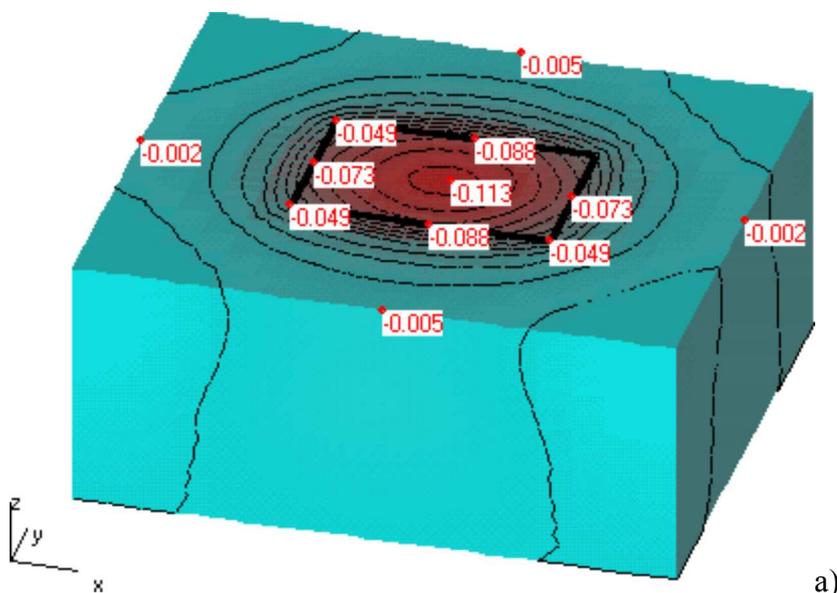
Шашкин А.Г., Шашкин К.Г.

Моделирование работы фундаментных плит - достаточно разработанная область геотехнических расчетов, в которой бесспорным является приоритет отечественных исследователей. Созданные еще в 1950 - 70-х годах модели упругого основания позволили с достаточной точностью учитывать пространственную работу грунта и выполнять совместные расчеты основания и плиты на существовавшем в то время уровне развития вычислительной техники. Среди этих моделей наиболее совершенными являлись модели Горбунова-Посадова и Пастернака.

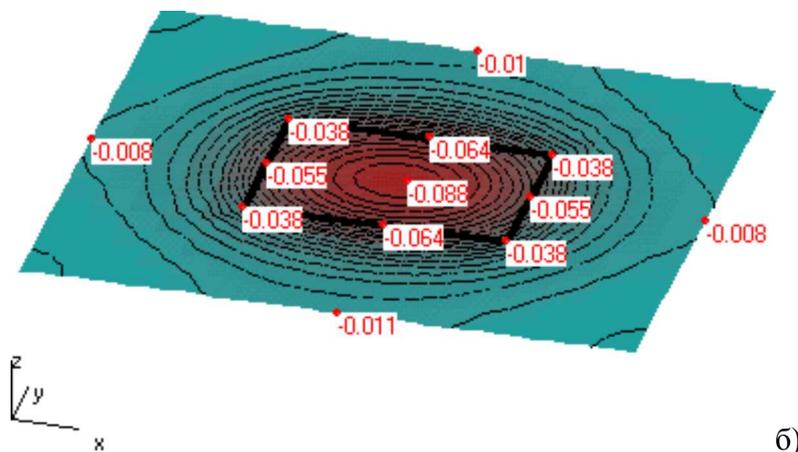
Модель Горбунова-Посадова предполагает расчет с одним переменным коэффициентом постели, который определяется путем деления давления по подошве плиты на величину ожидаемой осадки в данной точке. Принцип расчета заключается в итерационном совмещении расчетов осадок упругого основания от давления по подошве плиты и расчетов усилий в плите от неравномерности осадок. Как показывает практика, недостаток такого подхода заключается в медленной сходимости итерационного процесса, что приводит к существенной трудоемкости и неэффективности расчетов. По этой причине данный принцип не получил распространения в расчетной практике и не был реализован в известных компьютерных программах.

Существенно большее развитие на практике получили способы расчета с использованием постоянных коэффициентов постели. Как известно, модель с одним коэффициентом постели не позволяет учитывать пространственную работу грунта, взаимное влияние площадей нагружения и может привести к существенной недооценке усилий в плите. Эти недостатки были устранены Пастернаком, предложившим ввести второй коэффициент постели, учитывающий распределительную способность грунта. Им же были предложены формулы для вычисления коэффициентов постели для однослойного основания.

В 1967 г эти формулы были обобщены И.А.Медниковым для случая многослойного основания [1]. Как показывает проведенный нами анализ [2], расчеты по откорректированным формулам Медникова дают удовлетворительное совпадение с расчетами по упругой пространственной модели грунта (рис. 1). Двухконстантная модель упругого основания была реализована во многих компьютерных программах, получивших широкое распространение.



а)



б)

Рис. 1. Сравнение расчета плиты по различным моделям основания. Изображены изолинии осадок (м): а) расчет плиты по пространственной упругой модели грунта; б) расчет плиты по двухконстантной модели.

Большой опыт проектирования фундаментных плит был накоплен крупнейшими петербургскими институтами - Ленпромстройпроектом, ЛенНИИпроектом. Специалисты этих институтов установили высокую планку компетентности в области таких расчетов для самых разнообразных по сложности сооружений. На западе расчеты такой степени сложности для рядовых сооружений применялись и применяются далеко не всегда, прежде всего (по признанию автора свода американских геотехнических норм [3]) из-за высокой стоимости собственно расчетов. В справедливости этого замечания нам пришлось убедиться и на практике, когда одна иностранная фирма безуспешно пыталась спроектировать для пивоваренного завода "Балтика" в С-Петербурге фундаментную плиту под цех с большими неравномерно распределенными нагрузками. Расчеты проводились ими по модели балки на упругом основании для условно вырезанной из плиты полосы шириной в 1 м, что привело к ошибкам в армировании плиты на 60% ее площади.

К сожалению, в последние годы в нашем городе наблюдается общее снижение уровня компетентности в области геотехнических расчетов, в том числе, и в расчетах фундаментных плит. Это связано, прежде всего, с появлением на рынке проектных услуг мелких фирм, не только не располагающих собственными специалистами-геотехниками, но и экономящих на расчетной части проекта. Практика работы в городской экспертной комиссии по основаниям и фундаментам показывает, что к расчетам зачастую привлекаются недостаточно подготовленные специалисты, незнакомые с основными предпосылками применяемых ими расчетных моделей. Наиболее распространенной ошибкой является неверное назначение коэффициентов в двухконстантной модели Пастернака. Злую службу здесь могут сослужить имеющиеся в справочниках таблицы коэффициентов постели, зависящих только от вида грунта. В то же время любому специалисту-геотехнику должно быть известно, что коэффициент постели включает в себя как физические, так и геометрические характеристики: глубину сжимаемой толщи, зависящую, в свою очередь, от размеров фундаментной плиты. Особенно много ошибок встречается при выборе второго коэффициента постели, который зачастую принимается произвольно, как якобы не влияющий на результаты расчета. Это заблуждение тесно связано с другой ошибкой - неучетом в расчетной схеме так называемых законтурных элементов. Существует мнение, что они также мало влияют на результаты расчета. Однако такой эффект наблюдается как раз при ошибочном назначении второго коэффициента постели (его занижении). Между тем, модель Пастернака была создана именно для учета пространственной работы грунта, в частности, за пределами нагруженной области.

Эти ошибки весьма опасны, поскольку приводят к принципиально неверной схеме работы плиты. Например, равномерно нагруженная плита при подобных ошибках получает, согласно расчету, абсурдный для геотехника характер деформирования в виде выгиба с наибольшими осадками по краям нагруженной области.

Оставив в стороне грубые ошибки, можно убедиться в том, что даже при корректном назначении параметров двухконстантной модели ее использование приводит к некоторым неточностям, связанным со слишком большой степенью упрощения работы массива грунта. Действительно, в большинстве случаев при выводе формул для коэффициентов постели пренебрегают горизонтальными деформациями в массиве грунта, что приводит к занижению расчетной осадки, которое в отдельных случаях может достигать 30%. Кроме того, при выводе формул для коэффициентов постели задаются приближенной функцией распределения напряжений по глубине грунтового массива [2]. Еще одним недостатком использования упрощенных моделей работы основания является невозможность учета нелинейной работы грунта. В целом для большинства моделей упругого основания характерным является преувеличение распределительной способности грунта, обуславливающее чрезмерное развитие мульды оседания. Это связано с допущениями, введенными при построении упрощенных моделей, а также отсутствием учета пластических деформаций, возникающих под краями плиты.

Методы расчета, в которых основание моделируется пространственными конечными элементами лишены указанных недостатков. В этом случае работа грунта может быть описана различными нелинейными моделями, в наибольшей степени соответствующими рассматриваемой геотехнической ситуации, например, упругопластической моделью. Однако расчет совместного деформирования основания и плиты при моделировании основания пространственными конечными элементами оказывается достаточно сложной задачей. Действительно, для получения корректных значений усилий в плите требуется достаточно мелкая дискретизация расчетной схемы, что приводит к необходимости решать системы линейных алгебраических уравнений порядка 200000 неизвестных. До недавнего времени проводить подобные расчеты для рядовых сооружений было практически нереально, поскольку такая задача выдвигала слишком большие запросы к уровню ЭВМ и требовала огромных затрат машинного времени. Даже при современном уровне вычислительной техники большинство расчетных программ практически не справляется с подобными задачами.

При разработке программы FEM models были применены эффективные алгоритмы решения систем линейных алгебраических уравнений [см. статью К.Г.Шашкина «Использование эффективных алгоритмов решения больших систем линейных алгебраических уравнений в задачах геотехники» в данном номере журнала], что позволило работать с подобными системами (до 200000 уравнений) на вычислительной машине доступного для проектной фирмы уровня (Pentium-III, RAM 250 Mb). Время решения упругой задачи при этом составляет около 20 минут. Такая скорость работы программы позволяет проводить решение не только упругих задач, но и задач с учетом нелинейной работы грунта, которые при использовании метода последовательных приближений требуют многократного решения системы уравнений. Время счета при этом будет существенно зависеть от количества необходимых итераций, требуемых для достижения заданной точности при решении нелинейных задач. Как показывает практика это время для большинства подобных задач не превышает 1-1.5 часов. При такой скорости решения подобные задачи вполне можно использовать в проектной практике, где для всесторонней вариантной оценки конкретной геотехнической ситуации приходится выполнять десятки расчетов.

В качестве примера приведем расчет фундаментной плиты под реальное здание в сложных геотехнических условиях. Данная фундаментная плита под 16-этажное панельное здание нагружена распределенными нагрузками от стен здания, достигающими 50 т/пм. Плита опирается на тонкий слой песчаных грунтов, ниже которого расположена большая толща сильносжимаемых слабых отложений. При расчете плиты необходимо было не только получить абсолютные и относительные значения осадок, но и оценить зону влияния плиты для обеспечения сохранности окружающих зданий. В расчете была применена упругопластическая модель среды с предельной поверхностью, описываемой критерием Мизеса-Шлейхера-Боткина, поверхность пластического потенциала при этом предполагалась параллельной гидростатической оси. Серия проведенных расчетов позволила решить указанные задачи (результаты одного из вариантов расчета приведены на рис. 3). При этом с достаточной точностью были вычислены усилия в плите с учетом пространственной работы грунта как упругопластической среды. На рис. 4 изображены области

предельного состояния грунта под краями плиты. Учет зон пластических деформаций позволил более реалистично чем по упрощенным моделям оценить зону влияния плиты, величины осадок и усилий в плите (рис. 5).

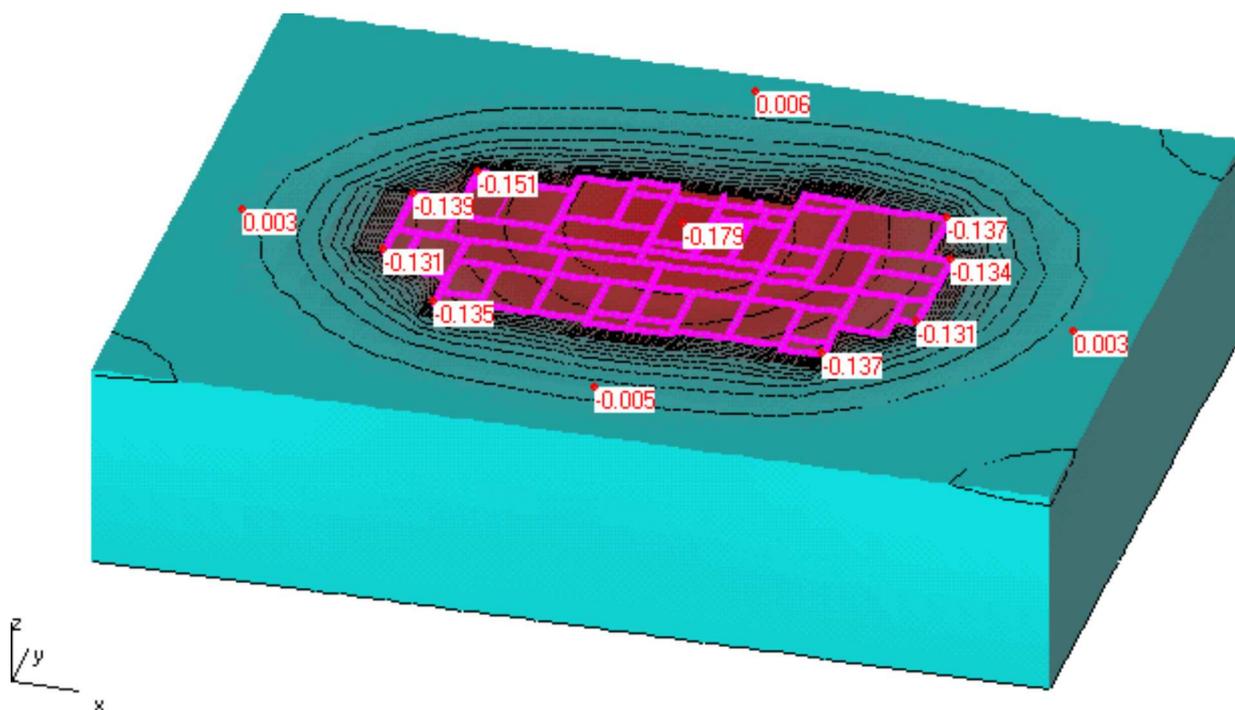


Рис. 2. Изолинии осадок плиты (м)

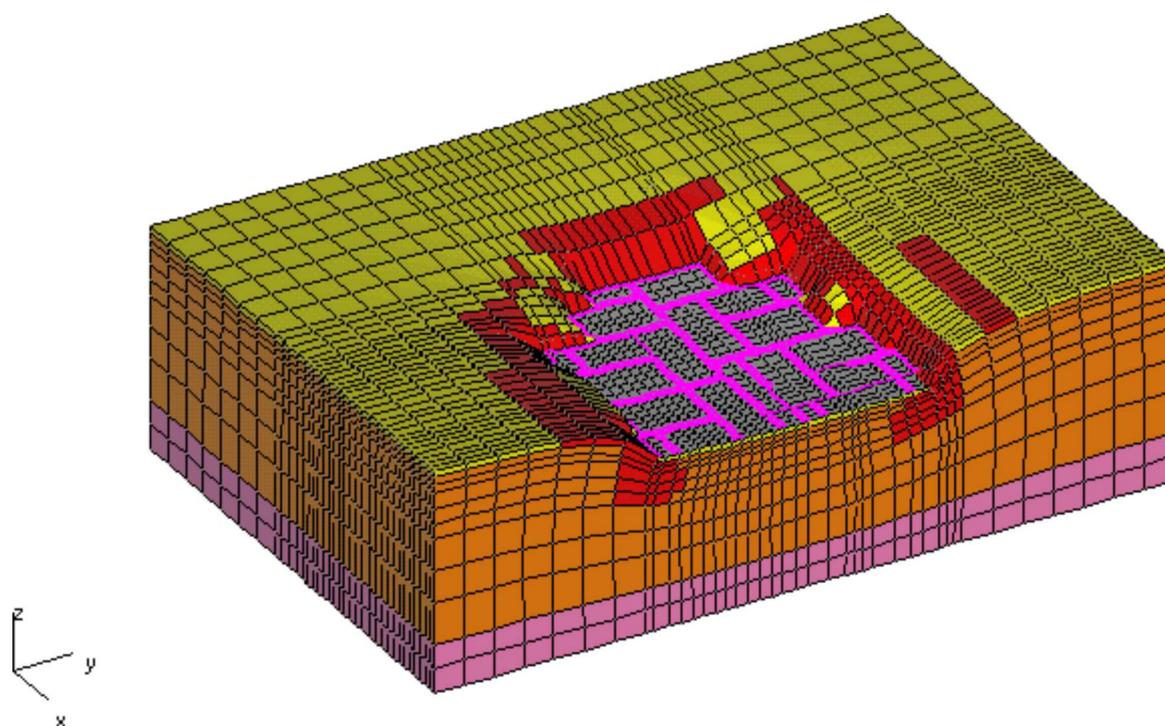


Рис. 3. Деформации плиты и основания (разрез). Масштаб деформаций увеличен в 20 раз. Темным цветом изображены области предельного состояния грунта.

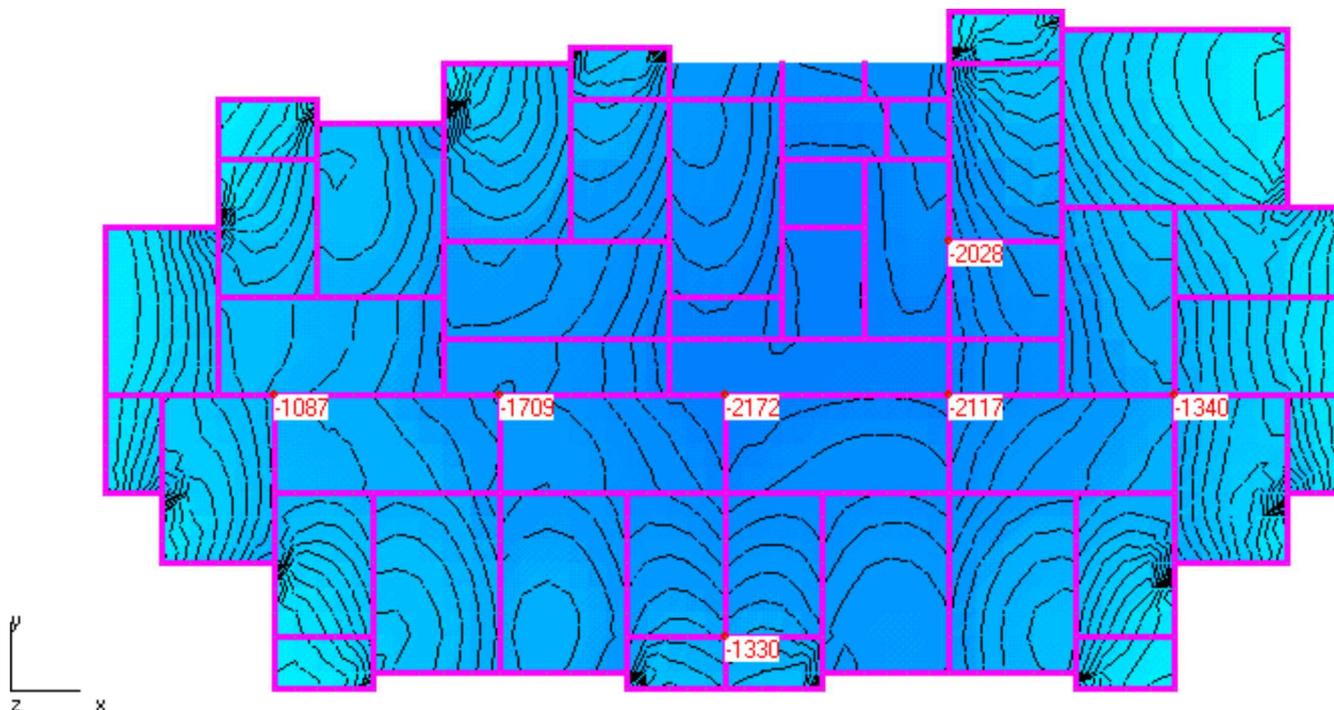


Рис. 4. Изолинии изгибающих моментов в плите в направлении оси x (кНм/мм)

В заключение отметим, что применение современной вычислительной техники и высокоэффективных расчетных программ позволяет отказаться от использования упрощенных моделей основания и применять при расчете плит пространственные модели, позволяющие более точно оценить пространственную работу грунта с учетом нелинейности работы основания.

Литература

1. Медников И.А. Коэффициенты постели линейно-деформируемого многослойного основания // Основания фундаменты и механика грунтов, 1967, №4.
2. Использование упрощенных моделей основания для решения задач совместного расчета основания и конструкций сооружений // Реконструкция городов и геотехническое строительство, 1999, №1
3. Joseph E. Bowles. Foundation Analysis And Design. Fifth Edition. McGraw-Hill Companies, Inc, 1996.