

ПЭТЧ-ТЕСТОВАЯ МОДЕЛЬ СЛОИСТЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ МКЭ

Наведено практичні рекомендації з використання петч-теста скінченно-елементної моделі шаруватих ґрунтових основ.

Представлены практические рекомендации по применению пэтч-теста конечно-элементной модели слоистых грунтовых оснований.

The article presents practical recommendations on application of patch-test of finite element model of the stratified soil bases.

В последние десятилетия в связи с развитием расчетных компьютерных комплексов, основанных на использовании численных методов, к числу которых относятся метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР), метод граничных элементов (МГЭ), метод дискретных элементов (МДЭ), метод граничных интервалов (МГИ), метод ячеек Воронина и некоторые другие, повысился интерес к решению научно-практических задач, которые не были реализованы из-за их сложности.

Известно, что некоторые задачи механики грунтов, механики горных пород и механики подземных сооружений были решены с помощью аналитических методов, и этот класс задач отличался введением многих допущений, без которых их решение было бы невозможным.

К сложностям решения многих задач относятся неоднородность и нерегулярность структуры исследуемых объектов, сложное специфическое поведение сред под нагрузкой и во времени, сложность учета взаимодействий частей исследуемых систем и так далее. Многие трудности, которыми отмечен этот класс задач, были учтены с появлением численных методов, в частности, метода конечных элементов. Реализация МКЭ в расчетных компьютерных комплексах позволила выполнить решение многих сложных задач, которые не были решены аналитическими методами.

Постоянное развитие расчетных компьютерных комплексов привело к другой сложности, а именно, к созданию адекватных действительным системам имитационных моделей. При этом важным вопросом является соответствие модели моделируемой системе, причем часто проверка адекватности невозможна по причине ее сложности. В частности, такими моделями являются те, с помощью которых

исследуется напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтовых массивов с разными видами слоистости. Такие модели считаются адекватными априори, без возможности их проверки, но появление новых возможностей МКЭ позволяет выполнять проверку верности и для этого класса моделей. Следует отметить, что разработанные модели оснований в большинстве случаев относятся к однородным [1; 2]. В то же время неоднородность грунтового основания существенно влияет на распределение его НДС при совместной работе с сооружением [3; 4].

Выбор модели основания должен быть обусловлен компромиссом между сложностью ее реализации при исследовании и требуемой точностью полученных результатов.

Исследование НДС основания при напластовании (слоистости) усложняется в случае сложного или несогласного залегания слоев, а также в случае линз [5]. Следует отметить, что особую сложность при исследовании таких оснований составляет отсутствие достаточно простых аналитических моделей, так как учет слоев с различными свойствами в грунтовой матрице аналитическими методами затруднен [1; 3; 5]. Поэтому особую роль в оценке НДС такого рода оснований играет исследование с помощью МКЭ [5–7].

Недостатком исследований слоистых оснований с помощью МКЭ является то, что многие положения моделирования фундаментов и оснований были переведены в раздел допущений, причем роль этих специфических положений не была выяснена. В дальнейшем анализе эти положения будут отражены, и будет сделан вывод, что полученные результаты отличаются достаточной адекватностью и достоверностью.

Разнообразие сложных инженерно-геологических условий доказывает особую важность расчета в случае слоистых (массивы с явно выраженными слоями грунтов с различными свойствами и характером залегания), структурно-неустойчивых (лессоподобные породы), неоднородных (подразумевается изменение свойств по высоте в массивах, сложенных достаточно прочными породами) и слабых (прочность 3...10 МПа на сжатие) грунтовых оснований. Следует отметить, что сложность инженерно-геологических условий приводит к тому, что понимание важнейших процессов, происходящих при взаимодействии нагрузок с транспортными сооружениями на грунтовых основаниях, часто бывает затруднено из-за отсутствия надежной информации и, как следствие, имеются ограниченные возможности прогнозирования основных факторов этого взаимодействия.

Указанные сложности связаны как со стадией проектирования и расчета, так и со стадией сооружения конструкций. При этом даже достаточный объем знаний о конструктивных особенностях транспортного сооружения в целом не решает проблему его поведения во взаимодействии с грунтовыми основаниями, которые представлены неоднородными, слабыми, структурно неустойчивыми и слоистыми грунтами. Следует отметить, что исследование случая слоя слабого грунта в матрице более прочного и менее деформируемого грун-

та аналитическими методами провести достаточно сложно, что подтверждает ограниченное количество информации по данному вопросу [5; 6; 9]. С помощью численных методов этот вопрос также рассматривался неполно, что может свидетельствовать о его новизне.

При изучении грунтовых массивов сложность при исследовании НДС обусловлена типом слоистости в виде неоднородного основания, которое сложено разнородными грунтами с различными свойствами (рис. 1).

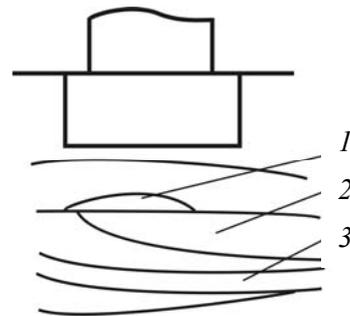


Рис. 1. Неоднородное слоистое основание:
1 – линза; 2 – несогласное залегание грунтовых слоев;
3 – прослойка слабого грунта

В этой связи построение модели грунтовой матрицы с внедренным в нее слоем слабого грунта ведется в режиме автоматической триангуляции модели со сгущением сетки на тонких участках (рис. 2, а, б) которая построена с использованием профессионального расчетного комплекса SCAD.

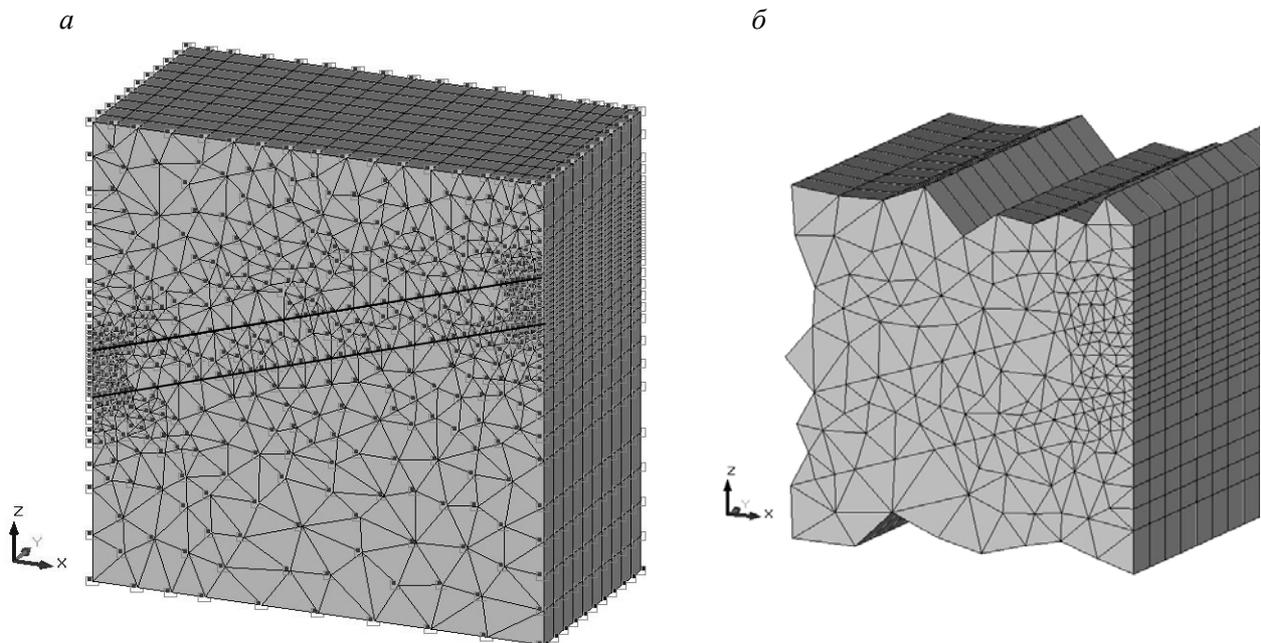


Рис. 2. Модель грунтового основания в случае слоя слабого грунта (слой показан черными линиями):
а – модель грунтовой матрицы с внедренным наклонным слоем; б – часть схемы в месте сгущения сетки

Модель грунтовой матрицы и слабого слоя создавались одновременно, а затем производилась автоматическая триангуляция, причем в местах выхода слоя на поверхность модели производилось некоторое сгущение сетки конечных элементов (см. рис. 2, б). Но так как процесс триангуляции неконтролируемый, то он негативно влияет на результаты расчета [8; 10].

Проблема снижения точности получаемых результатов, возникающая при применении автоматической триангуляции различных под-схем основной схемы, является одной из главных трудностей применения сложных моделей грунтового слоистого и неоднородного основания. Причем в случае слоистого основания с наклонными слоями применение автоматической триангуляции различных видов (с заданными минимальными и стороной объемом элемента, со сгущением сетки) практически незаменимо, так как ручное разбиение модели занимает значительное время, не сопоставимое с машинным временем расчета и часто превышающее его в десятки раз. Поэтому применение автоматической триангуляции требует выработки определенных приемов, позволяющих оценить точность получаемых в процессе расчета результатов.

В последнее время в области геомеханики и механики подземных сооружений, активно использующих численные методы, образовался класс задач, решение которых дает возможность оценки адекватности созданной модели реальной исследуемой системе. Эти задачи, решения которых получены аналитически, и поэтому данные задачи применяются для проверки достоверности результатов, полученных с помощью расчетного комплекса, и называются тестовыми. В области геомеханики такими тестовыми задачами являются:

1. Распределение напряжений в плоской схеме типа балка-стенка.
2. Распределение напряжений от собственного веса в объемной модели (задача Динника о гравитационном распределении напряжений в породном массиве).
3. Задача Фламана и Буссинеска, реализованная с помощью МКЭ.
4. Распределение напряжений вокруг отверстия.
5. Распределение напряжений в консольной балке, защемленной на конце.

Но наиболее эффективной тестовой задачей для выяснения достоверности модели слоистого основания, созданной путем автоматической триангуляции, можно считать пэтч-тест (patch-

test, лоскутно-кусочный тест). Данная тестовая задача оригинальным образом применяется для определения возможностей различных расчетных компьютерных комплексов. Этот тестовый метод был предложен в 70-х годах прошлого столетия Б. Айронсом [10] и является очень эффективным способом определения достоверности результатов, полученных в процессе расчета с помощью компьютерных комплексов на основе МКЭ. Но наиболее эффективно его применение в комплексе с задачей определения напряжений от собственного веса в объемной модели, что дает возможность с высокой точностью определить ее адекватность моделируемому объекту и достоверность полученных результатов расчета. Собственно пэтч-тест состоит в следующем. Обычную тестовую задачу решают численным методом (например, МКЭ) в невыгодных с точки зрения дискретизации условиях.

Под дискретизацией подразумевают разбиение модели на конечные элементы (КЭ), а в пэтч-тесте его подбирают таким образом, чтобы нормальную равномерную сетку КЭ заменить на хаотическую с различными размерами элементов и их местоположением. Совпадение численных результатов аналитическому решению является степенью оценки класса комплекса и созданной модели, качества которой в дальнейшем можно считать проверенными и внедрять в более сложные модели. Несомненно, при создании модели с пэтч-дискретизацией следует придерживаться общих правил дискретизации, то есть не применять так называемых «игольчатых» КЭ типа очень вытянутых треугольников, тетраэдров с малыми углами, гексаэдров с двумя линейными размерами, значительно меньшими третьего [11–13].

Особо следует отметить, что тестирование модели в расчетах МКЭ стало уже общепринятым, и не так часто его положения обговариваются, так как считается, что в серьезных исследованиях с помощью апробированных мощных компьютерных комплексов решение тестовых задач является подготовительной черновой работой. Но так как многие вопросы построения моделей, а также влияние некоторых свойств модели на результаты расчета (влияние связей, дискретизации, замены одного типа нагрузки другим и так далее) еще недостаточно изучены, тестирование моделей должно проводиться, и адекватность протестированной модели действительному объекту или модели, реализуемой аналитическим методом, должна оговариваться [14].

В случае исследования слоистого основания, представленного сложным напластованием, в роли разбиения пэтч-теста изначально выступает автоматическая триангуляция модели. Так как размеры КЭ, полученные в процессе триангуляции, разные, а также присутствует сгущение сетки, то условия такой дискретизации являются невыгодными.

Для иллюстрации вышеизложенного проведем расчет МКЭ с использованием объемной модели слоистого массива, дискретизированного с помощью автоматической триангуляции (пэтч-тест в комплексе с классической задачей Динника). Слоистость представлена наклонным слоем переменных размеров (см. рис. 2, а) и для того чтобы оценить достоверность результатов этому слою придаются те же деформативные характеристики, что и всей грунтовой матрице. Этот прием дает возможность сравнить напряжения в модели с напряжениями в массиве [15].

Для примера выберем следующие характеристики модели: модель пространственная из объемных КЭ изопараметрического типа, количество узлов – 6237, количество КЭ – 10430 штук. Размеры расчетной области – $10 \times 10 \times 5$ м, деформативные характеристики: модуль упругости $E = 59$ МПа, $\mu = 0,3$, $\gamma = 20$ кН/м³ (сухая прочная глина).

Исследование представленной модели проводилось на основе загрузки собственным весом массива для выяснения изменения поля напряжений и перемещений в случае сложного напластования.

На рис. 3, а–е представлены результаты численного анализа случая наклонного слоя в грунтовой матрице (перемещения по вертикальной и горизонтальной оси, главные вертикальные и горизонтальные напряжения (две компоненты)). На рис. 3, а, б наклонный слой выделен авторами для анализа его влияния.

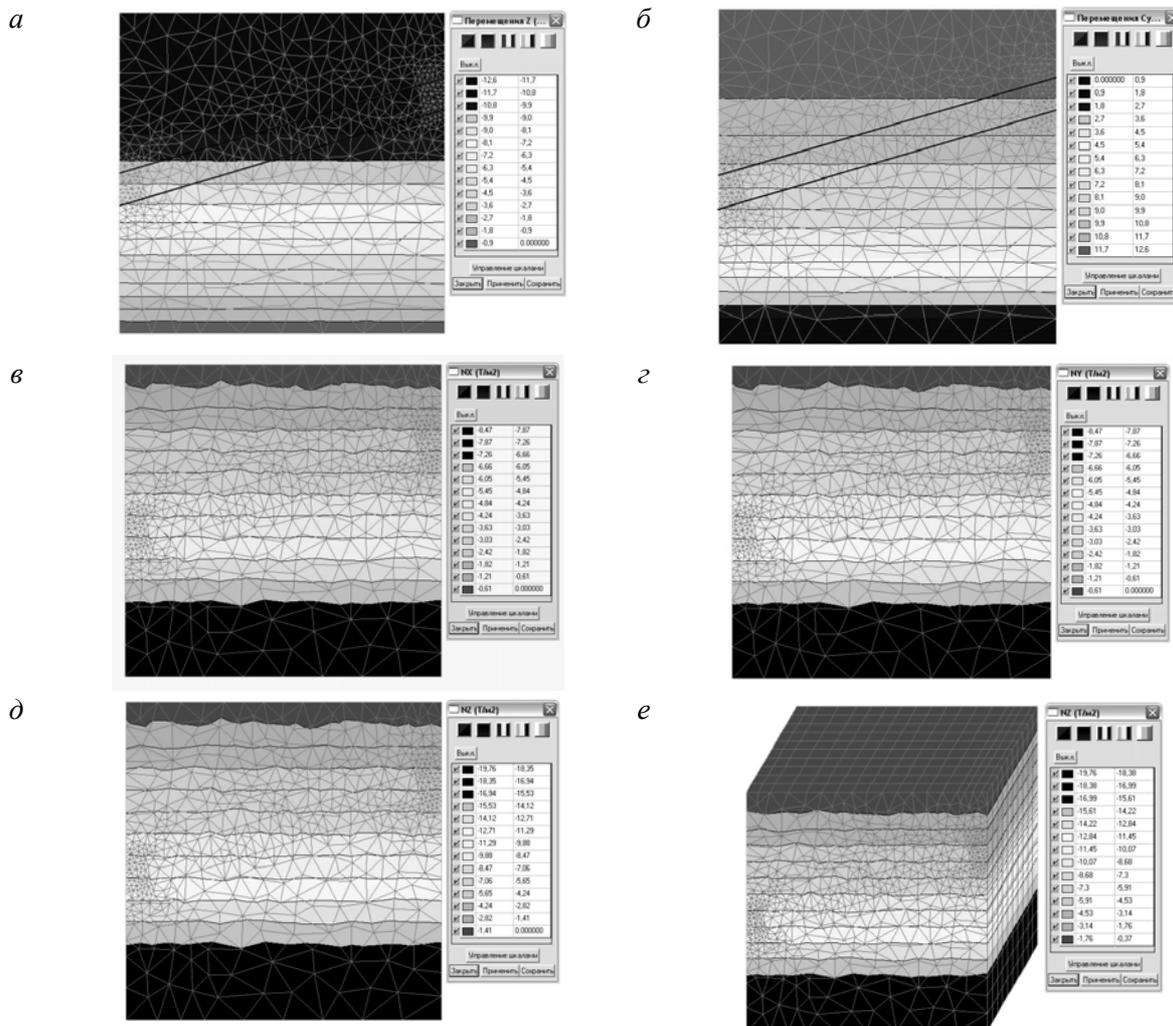


Рис. 3. Изолинии и изополя перемещений и напряжений:

а – перемещение по вертикальной оси; б – суммарные перемещения; в – напряжение σ_x ; г – напряжение σ_y ; д – напряжение σ_z ; е – напряжение σ_z , показанное в объеме модели

На рис. 4. приведены фрагменты модели, в сетках которых проводилось значительное сгущение.

Решение аналогичной задачи о распределении напряжений в массиве аналитическим способом, показывает, что распределение всех компонент напряжений должно быть парал-

лельно горизонтали. Данный факт может являться критерием адекватности результатов, полученных при расчете модели пэтч-теста, и распределения напряжений в действительности, так как они подчиняются закону распределения напряжений в аналитическом решении.

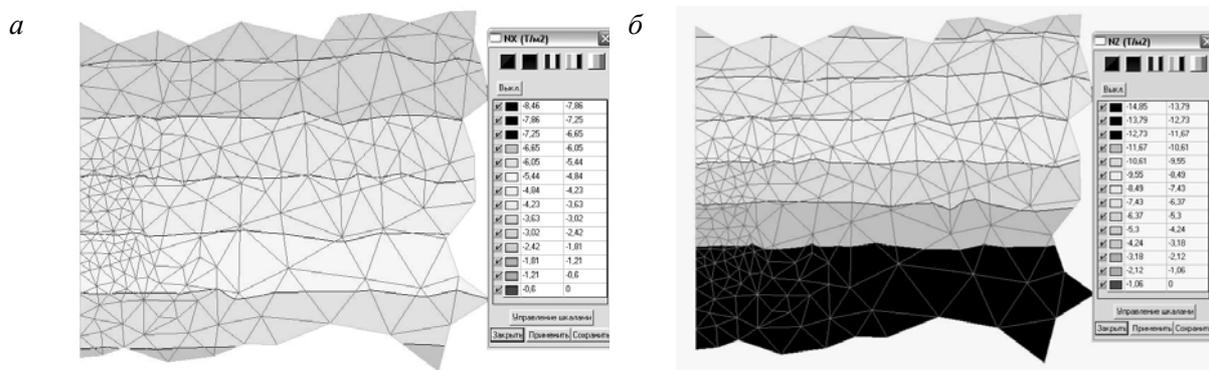


Рис. 4. Изолинии и изополя перемещений и напряжений:
 а – напряжение σ_x ; б – напряжение σ_z

Как видно из рис. 2, в-е полученные результаты достаточно близки результатам аналитического решения. Количественно значения компонент по всем трем осям отличаются от тех же значений, полученных аналитически не более чем на 2 %. Качественно картины имеют некоторые отличия, так как в случае модели пэтч-теста изолинии несколько искривлены, что свидетельствует о влиянии неравномерного разбиения модели автоматической триангуляцией. Изолинии перемещений (см. рис. 3, а, б) также несколько искажены, что доказывает влияние триангуляции на все параметры исследуемой модели.

На рис. 4. видны искажения изолиний напряжений в местах сгущения сетки триангуляции, которые незначительно отличаются от горизонтальных линий. Это объясняется сниженной сходимостью решения, пониженной передачей напряжений от одного КЭ к другому и так далее, поэтому решение задачи о распределении напряжений в массиве от собственного веса с использованием автоматической триангуляции дает четкое количественное представление о достоверности полученных данных, так как численное решение сравнивается с аналитическим и существует возможность получения относительных расхождений между ними.

Полученные данные об искажении изолиний хоть и доказывают негативное влияние автоматической триангуляции на результаты расчета, все же позволяют сделать вывод, что

они незначительны и, меняя картину полученных параметров качественно, не меняют ее количественно.

Результаты анализа параметров в модели свидетельствуют, что применение пэтч-теста в комплексе с задачей о распределении напряжений в массиве от собственного веса в случае слоистого основания показывает степень адекватности созданной модели действительному объекту и может применяться для тестовых задач геомеханики данного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Далматов Б. И. Практический расчет осадки фундамента методом ограниченной сжимаемой толщи. – Л.: Изд-во ЛДНТП, 1965. – 32 с.
2. Бугров А. К. К вопросу о расчете оснований сооружений / А. К. Бугров, В. П. Сипидин, Р. М. Нарбут // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1984. – № 4. – С. 27–28.
3. Малышев М.В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. – М.: Стройиздат, 1980. – 136 с.
4. Вялов С.С. Напряженно-деформированное состояние неоднородных оснований с наклонными слабыми слоями / С. С. Вялов, А. К. Бугров, А. Н. Цеева // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1989. – № 2. – С. 18–21.
5. Ухов С. Б. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учебник / С. Б. Ухов, В. В. Семенов и др. – М.: АСВ, 1994. – 577 с.
6. Киричек Ю. А. Комбинированные массивно-плитные фундаменты. Ресурсосберегающие методы расчета и проектирования. – Д.: ПГАСА, 2001. – 207 с.

7. Городецкий А. С. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А. С. Городецкий, В. И. Заворицкий, А. И. Лантух-Лященко, А. О. Рассказов. – М.: Транспорт, 1981. – 143 с.
8. Петренко В. Д. К вопросу о дискретизации конечно-элементных моделей / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин // Сб. научн. тр. ПГАСиА «Строительство. Материаловедение. Машиностроение». – Д., 2002. – Вып. 18. – С. 123–128.
9. Карпиловский В. С. SCAD для пользователя / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер и др. – К.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
10. Irons В.М. The superpatch theorem and other proposition relating to the patch tests // Proc. of the 5th Canadian Congress of Applied Mechanics, Fredericton, 1975. – pp. 651–652.
11. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 350 с.
12. Рикардс Р. Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. – Рига: Зинатне, 1988. – 284 с.
13. Большаков В. И. Основы метода конечных элементов / В. И. Большаков, Е. А. Яценко и др. – Д.: ПГАСиА, 2000. – 255 с.
14. Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К.: Сталь, 2002. – 600 с.
15. Петренко В. Д. Численный анализ влияния граничных условий модели системы «сооружение–основание» МКЭ / В. Д. Петренко, Т. А. Селихова, А. Л. Тютюкин // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Д.: НГУ, 2004. – №11. – С. 51–56.

Поступила в редколлегию 07.08.2005.