

01;05.1

Моделирование поведения сложных сред на основе совместного использования дискретного и континуального подходов

© С.Г. Псахье, А.Ю. Смолин, Ю.П. Стефанов,
П.В. Макаров, М.А. Чертов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
E-mail: asmolin@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 1 марта 2004 г.

Представлен новый подход к моделированию поведения гетерогенных сред, в котором исследуемый объект представляется состоящим из областей двух типов, описываемых в рамках дискретного и континуального подходов соответственно. Данный подход является перспективным для решения задач численного исследования поведения сложных сред с сильными различиями физико-механических свойств. Возможности такого подхода исследованы на примере задач о распространении упругих волн. Дискретная часть среды моделировалась методом подвижных клеточных автоматов, континуальная — конечно-разностным методом решения системы уравнений механики сплошной среды. Результаты расчетов показали, что предложенный подход позволяет адекватно описывать распространение упругих волн в сложных средах, а на границе их совмещения не происходит каких-либо нефизичных искажений.

Изучение закономерностей поведения сложных сред в условиях внешних воздействий различной природы является актуальной задачей при решении многих научных, технологических и инженерных проблем. Важную роль при этом играют методы и средства вычислительной механики. Долгое время в основе большинства численных методов лежали подходы механики сплошных сред, что во многом обусловлено спецификой рассматриваемых проблем. Следует отметить, что применение континуальных методов описания процесса деформации нередко приводит к значительным трудностям при наличии локализованной деформации, формировании несплошностей, интенсивных вихревых деформаций и перемешивании масс. Наиболее часто это имеет место при изучении высокопористых и гетерогенных материалов и композиций с сильным отличием физико-механических свойств.

Дискретные подходы, позволяющие явно моделировать процессы, связанные с перемешиванием масс, развивались главным образом для исследования гранулированных и сыпучих сред [1–4], для которых в качестве основных элементов могут рассматриваться частицы. По этой причине в большинстве работ используются уравнения движения, характерные для метода частиц [4], а силы взаимодействия вычисляются в рамках моделей жестких или мягких сфер. Однако этот формализм не позволяет корректно описывать поведение сплошных изотропных сред. Свободным от данного недостатка является численный метод, активно развиваемый в последние годы — метод подвижных клеточных автоматов [5–9] (МСА — movable cellular automata). Хотя данный метод и основан на дискретном подходе, в его основе лежат уравнения движения, отличные от классических. Так, в [7] показано, что при стремлении характерного размера автомата к нулю формализм метода позволяет перейти к соотношениям механики сплошной среды. Основным достоинством этого метода является возможность явным образом моделировать как поведение сплошных сред, так и эффекты перемешивания масс, включая формирование несплошностей различного типа (от генерации отдельных повреждений до распространения магистральных трещин). Это обстоятельство впервые создает предпосылки для совместного применения дискретного и континуального подходов в рамках единой расчетной методики, что позволит объединить их преимущества для решения задач, связанных с моделированием сложных объектов, где явно выделяются зоны интенсивных деформаций и разрушения.

Решению этой важной для развития вычислительной механики проблемы посвящена данная работа. В качестве базовых были выбраны два метода, успешно используемые в настоящее время: первый — основанный на континуальном подходе конечно-разностный метод решения динамических задач упругопластического деформирования сплошных сред; второй — основанный на дискретном описании метод МСА.

Поскольку в данном подходе используются два достаточно хорошо известных метода [5,6,10], рассмотрим лишь вопросы, касающиеся их совмещения.

Моделируемая среда рассматривается состоящей из континуальной (GRID) и дискретной (МСА) областей (рис. 1). При этом каждому узлу расчетной сетки, лежащему на границе совмещения областей (INTERFACE), ставится в соответствие некоторый автомат (элемент

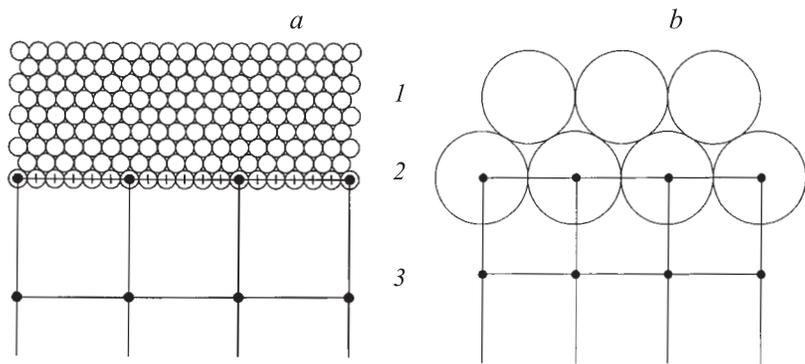


Рис. 1. Варианты сопряжения континуальной и дискретной расчетных областей для случаев, когда размер подвижных автоматов: *a* — меньше шага сетки, *b* — равен шагу сетки. 1 — MCA, 2 — INTERFACE, 3 — GRID.

метода MCA). В простейшем случае размер автомата совпадает с шагом сетки и между пограничными узлами нет дополнительных автоматов.

Для корректного описания совместного поведения континуальной и дискретной областей необходимо обеспечить непрерывность параметров состояния при переходе через границу совмещения. В данной работе согласование движения обеспечивалось на этапе расчета скорости граничных узлов. Конечно-разностное уравнение движения для них было записано в виде, позволяющем учесть все силы, действующие на совмещенные узлы-автоматы.

Алгоритм расчета состоит из пяти этапов и выглядит следующим образом.

1. Осуществляется расчет напряженно-деформированного состояния в континуальной области, рассчитываются скорости и координаты узлов.

2. Расчет скорости узлов, лежащих на границе совмещения, в отличие от внутренних точек континуальной области осуществляется по уравнениям движения с учетом сил, действующих со стороны дискретной области.

3. Осуществляется вызов подпрограммы, реализующей метод МСА. В нее передаются полученные значения координат и скоростей совмещенных узлов-автоматов, а также шаг интегрирования.

4. Осуществляется шаг (а в случае мелких автоматов несколько шагов) интегрирования метода МСА — рассчитываются новые положения и скорости всех автоматов, в том числе и силы, действующие на автоматы, совмещенные с узлами сетки.

5. Данные о граничных автоматах возвращаются в сеточный метод. Выполняется согласование величины нового шага интегрирования по времени.

Для исследования возможности объединения дискретного и континуального методов в рамках единой методики и тестирования разработанных алгоритмов были рассмотрены задачи о распространении упругих волн в среде со свободной поверхностью, когда имеется только одна линейная граница сопряжения двух методов (рис. 2). При этом механические характеристики континуальной и дискретной сред полагались одинаковыми, следовательно, формально задавалась однородная среда и граница сопряжения не должна была проявляться как граница раздела. Следует отметить, что использованные в работе численные методы ранее неоднократно применялись авторами по отдельности для описания динамических процессов, в том числе и распространения упругих волн [8–9,11–13].

На первом этапе рассматривалась задача о распространении плоской упругой волны, с фронтом, параллельным границе сопряжения. Расчеты показали, что прохождение волны через границу в обоих направлениях не сопровождалось формированием отраженной волны, также не было заметно искажения формы импульса. Это свидетельствует о том, что алгоритм сопряжения двух методов обеспечивает полную передачу количества движения в отсутствие сдвиговых деформаций.

На втором этапе была рассмотрена более сложная задача о генерации и распространении в среде со свободной поверхностью волн всех типов. Для этого участок поверхности упругого полупространства подвергался кратковременному действию локальной вертикальной нагрузки. Были рассмотрены два случая: 1) источник располагался симметрично — на линии сопряжения GRID и МСА областей; 2) источник был смещен относительно линии сопряжения в одну из областей. Во всех случаях анализировались детали распространения всех возникающих типов волн, а также симметрия поля скоро-

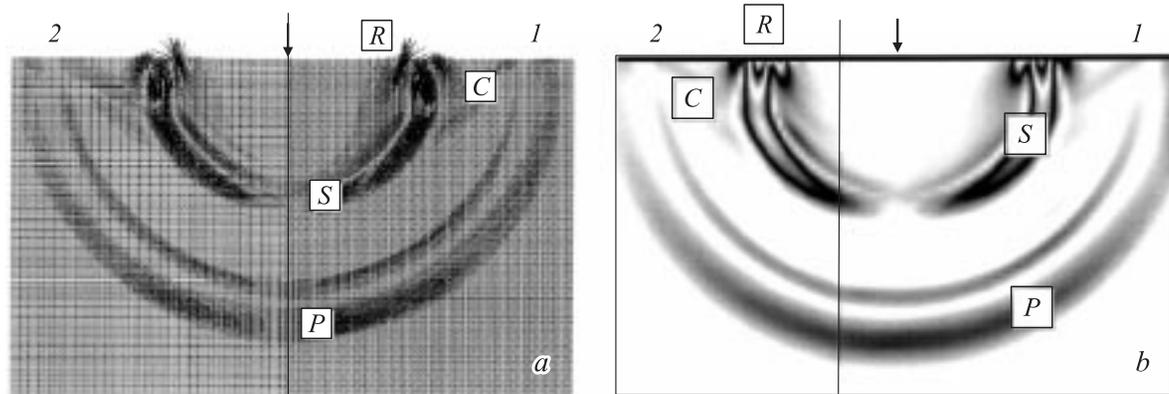


Рис. 2. Картина волнового поля при симметричном расположении источника (*a*) и при его смещении в дискретную область (*b*). 1 — MCA, 2 — GRID.

стей смещений. Тестирование проводилось как для квадратной, так и для плотной (гексагональной) упаковки автоматов в дискретной области.

В обоих случаях в результате воздействия в среде на некотором расстоянии от источника формируются продольная (P) и поперечная (S) волны, распространяющиеся с различными скоростями (рис. 2). Наличие свободной поверхности приводит к появлению так называемых конических и поверхностных волн. На рис. 2 хорошо видно, что в рассмотренных случаях коническая (C) волна проявляется только в области взаимодействия продольной волны со свободной поверхностью. Ее фронт тянется от места выхода продольной волны на поверхность до касания с фронтом поперечной волны. Вблизи свободной поверхности, чуть отставая от поперечной, бежит поверхностная волна Рэлея (R), которая имеет эллиптическую поляризацию и быстро затухает с глубиной.

Известно, что при прохождении волны через поверхность раздела сред, обладающих различными механическими характеристиками, или в случае, если она является поверхностью разрыва смещений (как показано, например, в [13]) возникает ряд отраженных и преломленных волн. Во всех рассмотренных случаях результаты расчетов не показали существенного искажения волновых фронтов (рис. 2), заметных вторичных (отраженных, преломленных и конических) волн не возникало.

Таким образом, представленные результаты численного моделирования распространения упругих волн в комбинированной среде с использованием континуального и дискретного методов позволяют сделать вывод о возможности совместного использования указанных методов для описания упругого поведения сложных сред. Перспективность разработанной методики и алгоритмов ее реализации подтверждены результатами тестовых расчетов, которые показали, что даже в случае сложных, динамически развивающихся упругих смещений в среде со свободной поверхностью предложенная методика не приводит к каким-либо искусственным или наведенным эффектам. Предложенный подход перспективен, прежде всего, для решения задач, связанных с численным исследованием поведения сложных сред с сильными различиями физико-механических свойств, что актуально не только для задач материаловедения и машиностроения, но и для многих проблем геомеханики, механики грунтов и горных пород.

Авторы выражают благодарность А.В. Димаки, Р.А. Бакееву и Е.П. Евтушенко за разработку графического интерфейса, средств визуализации и обработки результатов расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 01–05–64482 и № 00–15–96174), проекта 13.12 Президиума РАН, проектов 3.12.5 и 6.5.2 Программы фундаментальных исследований специализированных отделений РАН.

Список литературы

- [1] *Cundall P.A., Strack O.D.* // *Geotechnique*. 1979. V. 1. N 29. P. 47–65.
- [2] *Luding S.* // *Phys. Rev. E*. 1995. V. 52. N 4. P. 4442.
- [3] *Walton O.R.* // *Mech. of Materials*. 1993. N 16. P. 239–247.
- [4] *Herrmann H.J., Luding S.* // *Continuum Mech. Thermodyn*. 1998. N 10. P. 189–231.
- [5] *Псахье С.Г., Хори Я., Коростелев С.Ю.* и др. // *Изв. вузов. Физика*. 1995. В. 38. № 11. С. 58–69.
- [6] *Псахье С.Г., Остермайер Г.П., Дмитриев А.И.* и др. // *Физ. мезомех.* 2000. Т. 3. № 2. С. 5–13.
- [7] *Псахье С.Г., Чертов М.А., Шилько Е.В.* // *Физ. мезомех.* 2000. Т. 3. № 3. С. 93–96.
- [8] *Psakhie S.G., Horie Y., Ostermeyer G.P.* et al. // *Theor. and Appl. Frac. Mech.* 2001. V. 37. N 1–3. P. 311–334.
- [9] *Псахье С.Г., Ружич В.В., Смекалин О.П.* и др. // *Физ. мезомех.* 2001. Т. 4. № 1. С. 67–71.
- [10] *Уилкинс М.Л.* *Вычислительные методы в гидродинамике*. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
- [11] *Немирович-Данченко М.М., Стефанов Ю.П.* // *Геология и геофизика*. 1995. Т. 36. № 11. С. 96–105.
- [12] *Стефанов Ю.П.* // *Физ. мезомех.* 1998. Т. 1. № 2. С. 81–93.
- [13] *Stefanov Yu.P.* // *Theor. and Appl. Frac. Mech.* 2000. V. 34/2. P. 101–108.