

УДК 539.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ УДАРА И ПРОНИКАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ МЯГКИХ ГРУНТОВЫХ СРЕД

© 2011 г.

В.Г. Баженов, В.Л. Котов

НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

vkotov@inbox.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

На основе сочетания физического и математического моделирования процессов удара и проникания цилиндрических стержней разработан расчетно-экспериментальный метод идентификации деформационных и прочностных характеристик грунтовых сред в широком диапазоне изменения давлений. Представлена постановка задачи и методика расчета сил ударного взаимодействия тел вращения при наклонном проникании в мягкие грунтовые среды на основе гипотезы плоских сечений. Решение трехмерной задачи в пренебрежении потоками массы и импульса в окружном направлении сводится к совместному решению ряда двухмерных осесимметричных задач для каждого меридионального сечения. Результаты численного решения задачи о наклонном внедрении жесткого сферического тела в грунт, полученные предлагаемым методом, сопоставляются с решениями в полной трехмерной постановке и по модели локального взаимодействия с использованием одномерных решений о расширении сферической полости в сжимаемой и несжимаемой среде. Показано, что по сравнению с известными ранее моделями локального взаимодействия данный подход позволит заметно уточнить силы сопротивления и траектории тел благодаря учету динамики свободной поверхности и кавитационных эффектов отрывного обтекания, особенно на начальном этапе внедрения под углом к свободной поверхности, когда формируется отклонение траектории ударника от первоначального направления, и ошибка при использовании гипотезы несжимаемости является наибольшей.

Ключевые слова: математическое моделирование, удар, проникание, грунтовая среда, модель локального взаимодействия.

Постановка задачи идентификации параметров модели грунтовой среды

Динамическое деформирование грунтовых сред при ударном нагружении описывается в рамках математической модели Григоряна [1] и формулируется с позиций механики сплошных сред на основе законов сохранения массы, импульса и уравнений теории пластического течения. Идентификация деформационных и прочностных параметров уравнения состояния грунтовых сред осуществляется на основе сочетания обращенных экспериментов с использованием мерного стержня и численного моделирования процессов удара и проникания цилиндрических стержней в грунтовые среды [2]. Основные положения методики [3] идентификации пластических свойств грунтовых сред следующие. Входными данными служит экспериментальная зависимость квазистационарных значений силы сопротивления внедрению ударника с плоским торцом от начальных скоростей удара. Искомая зависимость предела текучести от давления определяется безусловной минимизацией функционала, описывающего сум-

марное рассогласование теоретических и экспериментальных данных в некотором диапазоне скоростей. Эффективность метода демонстрируется решением задачи идентификации параметров модели грунтовой среды Григоряна для песчаного грунта при скоростях внедрения до 1 км/с и давлениях 1.5 ГПа на основе данных физического и численного моделирования [2, 3].

Постановка и методика решения задачи наклонного проникания

Рассматривается удар и начальный этап плоскопараллельного движения осесимметричного тела под углом θ к свободной поверхности полупространства, занимаемого грунтовой средой [1]. Ось Oz прямоугольной декартовой системы координат направлена вдоль скорости V_0 движения тела и образует с осью Ox плоскость симметрии xOz , ось Oy направлена перпендикулярно плоскости xOz . Уравнения движения проникающего тела имеют вид $m\dot{V}_z = F_z$, $m\dot{V}_x = F_x$, $J\ddot{\omega} = M$, где F_z , F_x и V_z , V_x – компоненты главного вектора сил и вектора скорости тела, M – момент сил,

ω – угловое ускорение, m и J – масса и момент инерции тела.

Решение трехмерной задачи в пренебрежении потоками массы и импульса в окружном направлении сводится к совместному решению для каждого меридионального сечения ряда двумерных осесимметричных задач, методики решения которых в настоящее время достаточно хорошо разработаны [4, 5]. Количество сечений определяется углом наклона вектора скорости тела к свободной поверхности среды и требуемой точностью решения задачи [5–7].

Компоненты главного вектора сил на каждом временном шаге расчета определяются суммированием по сечениям вкладов компонент сил сопротивления внедрению ударника в грунт, полученным из решения осесимметричных задач. Компоненты векторов силы и скорости тела рассчитываются независимо друг от друга, что оправданно в условиях значительного преобладания осевой компоненты вектора скорости над боковой составляющей, возникающей при несимметричном проникании. Подобное допущение основано на результатах исследований явления рикошета затупленных тел при их проникании в песок и пластилин [8]. Экспериментально установлено достаточно малое отклонение траектории движения компактных тел (шарик, конус, цилиндр) от первоначального направления, которое практически не зависит от угла входа тела и уменьшается с ростом скорости удара. Взаимное влияние компонент главного вектора скорости в большей мере сказывается при внедрении в грунт удлиненных тел, которое сопровождается появлением вращательного движения.

Результаты сравнительного анализа

Анализ экспериментальных данных по прониканию жесткого ударника в грунтовые и другие пористые среды свидетельствует об их нестабильности, что привело к развитию упрощенных подходов к моделированию нестационарных процессов проникания в геоматериалы. Широкое распространение получили приближенные подходы с использованием моделей локального взаимодействия (МЛВ) для связи кинематических и силовых факторов на площадке контакта тела и среды [9, 10]. В соответствии с МЛВ, давление в каждой точке боковой поверхности ударника отождествляется с давлением на внутренней поверхности сферической или цилиндрической полости, расширяющейся в безграничной среде от нулевого радиуса до радиуса ударника («Cavity Expansion Model» в зарубежной литературе), ко-

торое может быть определено аналитически в предположении несжимаемости среды.

Приводятся результаты численного решения задачи о прямом и наклонном внедрении жесткого сферического тела в грунт, полученные предлагаемым методом, в сопоставлении с решениями в полной трехмерной постановке и по МЛВ с использованием одномерных решений о расширении сферической полости в сжимаемой и несжимаемой среде. Показано, что МЛВ на базе точного решения при учете линейной сжимаемости и зависимости предела текучести от давления дает решения, близкие к точному, лишь на начальной стадии внедрения. Использование гипотезы несжимаемости при постоянном пределе текучести приводит к занижению силы сопротивления на начальной стадии удара. Результаты расчетов по предлагаемому алгоритму хорошо соответствуют результатам трехмерных расчетов вплоть до момента полного погружения полусферы в грунт. Дальнейшее движение ударника прямолинейно и определяется только осевой компонентой силы сопротивления, так как радиальная компонента становится близкой к нулю.

Работа выполнена при финансировании в рамках Программы государственной поддержки ведущих научных школ России (НШ-4807.2010.8), Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также при финансовой поддержке РФФИ (проект №10-08-00376-а).

Список литературы

1. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов // ПММ. 1960. Вып. 4. С. 1057–1072.
2. Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л. Экспериментально-теоретическое исследование процессов проникания жестких ударников и идентификация свойств грунтовых сред // ПМТФ. 2009. Т. 50, №6. С. 115–125.
3. Баженов В.Г., Котов В.Л. Идентификация параметров динамической сжимаемости и сопротивления сдвигу грунтовой среды при внедрении ударников // Докл. РАН. 2006. Т. 408, №3. С. 333–336.
4. Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л., Кочетков А.В. Исследование удара и проникания тел вращения в мягкий грунт // ПММ. 2003. Т. 67. Вып. 4. С. 686–697.
5. Баженов В.Г., Котов В.Л. Математическое моделирование процессов удара и проникания осесимметричных тел и идентификация свойств грунтовых сред. М.: Физматлит, 2010. 207 с.
6. Баженов В.Г., Котов В.Л. Решение задач о наклонном проникании осесимметричных ударников в мягкие грунтовые среды на основе гипотезы плоских сечений // Докл. РАН. 2008. Т. 423, №4. С. 470–473.
7. Баженов В.Г., Котов В.Л. Решение задач о наклонном проникании осесимметричных ударников в

мягкие грунтовые среды на основе моделей локального взаимодействия // ПММ. 2010. Вып. 74, №3. С. 391–402.

8. Бивин Ю.К. Изменение направления движения твердого тела на границе раздела сред // Изв. АН СССР. МТТ. 1981. №4. С. 105–109.

9. Крайко А.Н., Якунина Г.Е. К построению оптимальных тел в рамках моделей локального взаимодействия // ПММ. 2008. Т. 72. Вып. 1. С. 41–53.

10. Мирошин Р.Н., Халидов И.А. Локальные методы в механике сплошных сред. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. 304 с.

IMATHEMATICALLY MODELING NONSTATIONARY IMPACT AND PENETRATION PROCESSES AND THE IDENTIFICATION OF THE PROPERTIES OF SOFT SOILS

V.G. Bazhenov, V.L. Kotov

Based on the combination of physically and mathematically modeling the processes of impact and penetration of cylindrical rods, a computational-experimental method for identifying deformational and strength properties of soil media in a wide range of pressure changes has been developed. A formulation of the problem and a methodology are presented for analyzing the impact interaction forces of bodies of revolution for their oblique penetration into soft soils, based on the plane cross-section hypothesis. Neglecting the mass and pulse flows in the circumferential direction, the solution of a 3D problem reduces to the joint solution of a set of 2D axisymmetric problems for each meridian cross-section. The results of numerically analyzing the problem of oblique penetration of a rigid spherical body into a soil obtained using the above method are compared with the solutions for a full 3D formulation and for the model of local interaction using 1D solutions of a widening spherical cavity in compressible and incompressible media. It is shown that, as compared with the already available local interaction models, the present approach will make it possible to considerably increase the accuracy of estimating the resistance forces and trajectories of the bodies by accounting for the dynamics of the free surface and cavitation effects of detached flow, especially at the initial stage of penetration at an angle to the free surface, when a deflection of the trajectory of the striker from its initial direction is formed, and the use of the incompressibility hypothesis reaches its maximum.

Keywords: mathematical modeling, impact, penetration, soil medium, local interaction model.