

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВНЕДРЕНИЯ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ УДАРНИКОВ В СУХОЙ ПЕСОК

© 2011 г. *В.Вас. Баландин¹, В.Вл. Баландин², С.В. Крылов¹, Е.В. Цветкова¹*

¹НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

²Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

balandin@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Для определения интегральных нагрузок, действующих на цилиндрические ударники с полусферическим оголовком при внедрении в сухой песок, использовались две взаимодополняющие экспериментальные методики. Методика мерного стержня в обращенном эксперименте позволила определить силы сопротивления на начальном нестационарном участке внедрения, а методика прямого эксперимента с использованием высокоскоростной киносъемки позволила определить коэффициент сопротивления на квазистационарном участке внедрения. Эксперименты проводились в диапазоне скоростей 100–400 м/с с ударниками из закаленной стали. По результатам проведенных экспериментов были построены зависимости максимальных сил сопротивления и коэффициента сопротивления внедрению на квазистационарном участке от скорости удара. Проведены численные расчеты проникания в песок при условиях, совпадающих с экспериментальными. В качестве расчетного комплекса использовался двумерный пакет программ UPSGOD. Грунтовая среда описывалась моделью Григоряна с параметрами, определенными по результатам плосковолновых экспериментов и экспериментов с использованием модифицированного метода Кольского. Полученные расчетные результаты находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

Ключевые слова: экспериментальный метод, численный расчет, проникание в грунт.

Исследование процессов внедрения цилиндрических ударников с полусферическим оголовком в преграды из сухого песка проводилось с использованием двух методик, отличающихся схемами регистрации основных параметров процесса. Первая из них – методика прямого эксперимента с фоторегистрацией [1] – позволяет получать теневую картину процесса взаимодействия ударника с грунтовой мишенью и далее по этой картине строить зависимость глубины проникания от времени и определять коэффициент сопротивления внедрению на квазистационарном участке проникания. Вторая методика обращенного эксперимента с использованием мерного стержня [2] позволяет измерять интегральные нагрузки на начальном этапе внедрения. Сочетание двух методик позволяет подробно исследовать общую картину взаимодействия ударника с мишенями и измерять интегральные нагрузки, действующие на ударник, как на нестационарном начальном участке внедрения, так и на квазистационарном участке.

В качестве преграды использовался сухой песок естественного состава, из которого были удалены частицы более 1 мм и менее 0,1 мм. При проведении прямых экспериментов песок засы-

пался в стальной контейнер длиной 350 мм и внутренним диаметром 130 мм. Плотность песка составляла 1750 ± 10 кг/м³. Исследование проводилось с использованием ударников диаметром 19,8 мм, общей длиной 100 мм и массой около 80 г с полусферическими головными частями. Радиус полусферы составлял 10 мм. Ударники были изготовлены из закаленной стали 45 и для облегчения делались полыми.

Эксперименты проводились в диапазоне скоростей 50–400 м/с. Было проведено 30 экспериментов. В прямых экспериментах процесс внедрения фиксировался высокоскоростной кинокамерой. По полученным в экспериментах кинограммам проникания были построены зависимости глубины проникания от времени для всех скоростей удара. Далее по зависимостям время – глубина проникания определялся коэффициент сопротивления C_x на участке после внедрения головной части.

В обращенных экспериментах исследование основных закономерностей проникания полусферических ударников в песчаные мишени проводилось в диапазоне скоростей от 80 до 370 м/с. Контейнеры заполнялись сухой песчаной смесью, аналогичной по составу использовавшейся в пря-

мых экспериментах. Было проведено 26 экспериментов. Средняя плотность песка в данной серии опытов составляла 1760 кг/м^3 . Размеры метаемых контейнеров, изготовленных из сплава Д16-Т: наружный диаметр 56.8 мм, внутренний диаметр 54 мм, высота засыпки песка колебалась в пределах 55–65 мм. Толщина дна контейнера равна 2 мм. По результатам обращенных экспериментов построены зависимости силы сопротивления от времени при различных скоростях удара, определены максимальные силы сопротивления, действующие на головную часть ударника. Построена зависимость максимальной силы сопротивления от скорости удара. Выявлено, что начальный участок проникания полусферических ударников в песчаную мишень характеризуется сильной нестационарностью. Об этом свидетельствует характер изменения силы сопротивления во времени. Максимального значения силы сопротивления достигают за время 25–50 мкс (с ростом скорости удара время достижения максимума уменьшается) при заглублении ударника на 5–6 мм, т.е. на 0.5–0.6 радиуса.

Для более подробного изучения процесса соударения были проведены численные расчеты задачи ударного взаимодействия ударника с грунтом, соответствующей экспериментальной постановке исследований. В качестве расчетного комплекса использовался двумерный пакет программ UPSGOD, основанный на модифицированной схеме С.К. Годунова [3, 4]. Особенностью метода является использование произвольных подвижных эйлера-лагранжевых разностных сеток для описания движения взаимодействующих объектов. Грунтовая среда описывалась моделью Григоряна с параметрами, определенными по результатам плосковолновых экспериментов и экспериментов с использованием модифицированного метода Кольского [5, 6].

При сравнении результатов прямых и обращенных экспериментов был сделан вывод о достаточно быстром переходе от нестационарной стадии внедрения к квазистационарной. Этот процесс протекает при погружении ударника на плу-

бину 1.5–2 калибра. Данный вывод подтверждается и результатами расчетов. Можно отметить, что численные результаты находятся в удовлетворительном соответствии с результатами как прямых, так и обращенных экспериментов и отличаются от них не более чем на 10–15%.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что использование двух независимых экспериментальных методик, в совокупности с расчетными результатами, позволяет повысить информативность исследований процессов проникания твердых тел в грунтовые среды. Полученные с помощью этих методик экспериментальные и теоретические результаты существенно расширяют представления о процессах взаимодействия осесимметричных тел с мягкими грунтами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №09-08-00711 и 10-08-00376).

Список литературы

1. Баландин В.В., Брагов А.М. Лабораторная установка для изучения процессов соударения // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов. Все-союзн. межвуз. сб. / Горьк. ун-т. 1990. С. 112–115.
2. Баженов В.Г. и др. Экспериментально-теоретическое исследование процессов взаимодействия ударников различной формы с преградой из песка // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. II науч. конф. Волжского регион. центра РАН. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 334–339.
3. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976.
4. Абузьяров М.Х. и др. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред // ЖВМиМФ. 2000. Т. 40, №6. С. 940–953.
5. Брагов А.М., Грушевский Г.М. Влияние влажности и гранулометрического состава на ударную сжимаемость песка // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 12. С. 70–72.
6. Bragov A.M. et al. Determination of physicomachanical properties of soft soils from medium to high strain rates // International Journal of Impact Engineering. September 2008. Vol. 35, Is. 9. P. 967–976.

THE EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE PENETRATION OF HEMISPHERICAL STRIKERS INTO DRY SAND

V. Vas. Balandin, V.V. Balandin, S.V. Krylov, E.V. Tsvetkova

Two complementary experimental methodologies were used to determine integral loads acting on a cylindrical striker with a hemispherical nose penetrating into dry sand. The measuring rod methodology in an inverse experiment made it possible to determine the resistance force at the initial non-stationary penetration stage, whereas the methodology of the direct experiment in combination with high-speed photography made it possible to determine the resistance coefficient at the quasi-stationary penetration stage. The experiments were done in the velocity range of 100 to 400 m/s using strikers of hardened steel. The

experimental results were used to construct curves of maximum resistance forces and the penetration resistance coefficient as a function of the impact velocity at the quasi-stationary stage. Penetration into sand under the conditions similar to the experimental ones was also numerically analyzed. The 2-D UPSGOD software package was used as a computation complex. The soil medium was described using Grigoryan's model with parameters determined from plane-wave experiments and experiments using modified Kolsky method. The computational results obtained are in good agreement with the experimental data.

Keywords: experimental method, numerical calculation, penetration into soil.