

МЕХАНИКА

УДК 539.3

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВНЕДРЕНИЕ ЖЕСТКИХ УДАРНИКОВ В БЕТОННЫЕ ПРЕГРАДЫ

© 2008 г. *А.И. Садырин*¹, *С.В. Крылов*¹, *А.Б. Батарин*², *С.А. Пирогов*¹¹ НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского² Центральный научно-исследовательский институт, г. Сергиев Посад-7

sadyrin@dk.mech.unn.ru

Поступила в редакцию 30.06.2008

Предложены уравнения математической модели деформирования и разрушения малопластичных разносопротивляющихся сред при действии динамических нагрузок. Модель включает в себя три предельные поверхности, зависящие от трёх инвариантов тензора напряжений: поверхность пластичности (пластический потенциал) среды с частичными повреждениями структуры, поверхность разрушения и поверхность пластичности среды с полностью нарушенной структурной прочностью. Верификация модели проведена путем сопоставления расчетных данных с результатами натурных экспериментов по прониканию жестких ударников в бетонные преграды. Анализом результатов вычислительных экспериментов выявлены особенности процессов ударного взаимодействия жестких ударников с бетонными преградами в зависимости от условий соударения.

Ключевые слова: разносопротивляющиеся среды, бетон, проникание.

Задачи динамического деформирования и разрушения массивов бетона, железобетонных конструкций, скальных и полускальных горных пород при интенсивных внешних воздействиях приобрели в последнее время особую актуальность [1–4]. Последствия от нарушения прочности инженерных сооружений и конструктивных элементов, включающих в свой состав эти материалы, могут представлять большую экологическую опасность, вызывать значительные материальные потери или приводить к человеческим жертвам. Во многих приложениях получение соответствующих прочностных оценок требуется при воздействии на массивы бетона и горных пород нагрузок, вызванных ударом жестких либо деформируемых ударников при скоростях удара до нескольких сотен метров в секунду. В зависимости от условий соударения основной интерес в этих задачах представляют величины перегрузок (интегральные силы сопротивления внедрению), финальная глубина внедрения ударника, запреградные скорости осколков при сквозном пробитии, определение объемов разрушений и т.п.

Прочностной анализ в подобных задачах, учитывая трудоемкость и дороговизну натуральных динамических испытаний, целесообразно проводить путем совместного использования

результатов модельных экспериментов с вычислительными экспериментами, основанными на применении современных численных методов. При этом успех вычислительных экспериментов во многом определяется реалистичностью используемой в расчетах модели проведения материала и оснащенностью ее данными о реальных динамических физико-механических свойствах. Математические модели динамического поведения материалов, относящихся к группе малопластичных разносопротивляющихся сред [2–4], формулируются обычно в рамках механики однофазных сплошных сред. В настоящее время преимущественное развитие получают компьютерные модели, базирующиеся на соотношениях дифференциальных теорий пластичности с одной или несколькими предельными поверхностями в пространстве напряжений [1, 2] и достаточно полно и адекватно учитывающие физическую нелинейность, трещинообразование и разрушение материала в условиях многоосного напряженного состояния и зависимость прочностных свойств от скорости деформирования.

Экспериментальные данные о динамическом поведении разносопротивляющихся сред свидетельствуют [3–6], что сопротивление деформированию и прочность зависят от среднего на-

пряжения, вида напряженного состояния и скорости деформирования. Отмечаются также влияющие на характеристики контактного взаимодействия эффекты задержки времени разрушения и возрастание прочностных параметров материала при высоких скоростях деформаций в несколько раз по сравнению со случаями статического нагружения. Особенностью диаграмм деформирования разносопротивляющихся материалов является наличие ниспадающей ветви диаграммы. Это так называемая, неравновесная фаза деформирования. Процесс неравновесной релаксации напряжений при динамическом деформировании разносопротивляющейся среды начинается после достижения предела прочности (максимума напряжений). Максимум напряжений интерпретируется как состояние материала с предельным уровнем повреждений, представляющих собой систему микро и макротрещин, пор, нарушений межграницной прочности элементов структуры и т.д., накопленных на стадии квазиравновесного упругопластического деформирования. Неравновесная стадия деформирования в этом случае интерпретируется как монотонное снижение структурной прочности среды (фрагментация). Фрагментированная среда оказывает более низкий уровень сопротивления деформированию по сравнению со средой пластически деформирующейся и накапливающей повреждения.

На рис. 1 в схематичном виде представлены заимствованные из работы [6] полные диаграммы растяжения–сжатия бетона. Пределы прочности, соответствующие одноосным напряженным состояниям растяжения и сжатия помечены символами σ_p и σ_c соответственно. Начало неравновесных ветвей на диаграмме деформирования помечено на рисунке буквой. В общем случае величины пределов прочности (максимумы напряжений), также как и уровни сопротивления фрагментированной среды S зависят от первого инварианта тензора напряжений, вида напряженного состояния и скорости деформирования.

Суммируя отмеченные экспериментальные факты и следуя работам [7–9], укажем основные положения модели динамического деформирования и разрушения скальных горных породы и бетона, как разносопротивляющихся сред. Для девиаторных составляющих тензоров напряжений и деформаций вводятся три предельных поверхности: поверхность пластичности (пластический потенциал) среды с частичными повреждениями структуры, поверхность разрушения и поверхность пластичности среды с полностью нарушенной структурной прочностью.

В зависимости от текущего уровня напряженно-деформированного состояния и предшествующей истории его изменения модель включает следующие варианты состояния материала с соответствующими им уравнениями поведения.

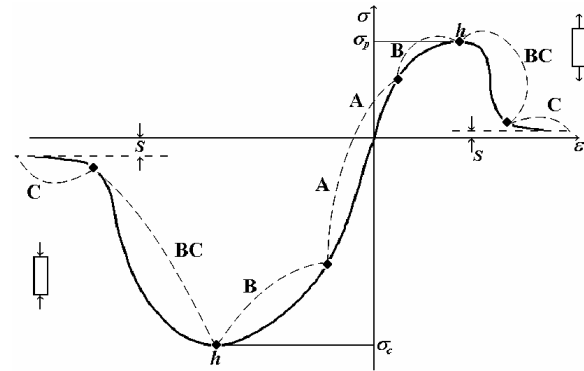


Рис. 1. Схема полной диаграммы растяжения–сжатия бетона

Состояние (А) упругого деформирования описывается законом Гука для изотропной однофазной среды. Зона упругого поведения материала ограничивается текущим уравнением поверхности пластичности с частичными повреждениями структуры

$$F_p(\sigma_{ij}, \dot{\epsilon}, \vartheta, \omega) = \tilde{\sigma}_i - \left(A_p - \frac{B_p \tilde{I}}{1 - \gamma B_p \tilde{I}} \right) \beta(\varphi) q(\omega, \vartheta) = 0. \quad (1)$$

Здесь и далее $\tilde{\sigma}_i$ и \tilde{I} – интенсивность девиатора напряжений и первый инвариант тензора напряжений соответственно, отнесенные к величине предела прочности при одноосном сжатии; ϑ – параметр упрочнения; $\omega \in [0, 1]$ – параметр поврежденности; $\beta(\varphi)$ – функция описывает влияние угла φ фазы девиатора напряжений, определяемого соотношением $\cos(3\varphi) = 13.5 \frac{J_3'}{\sigma_i^3}$,

где J_3' – третий инвариант (определитель) девиатора напряжений. Уравнение начальной поверхности пластичности представляется функцией (1) при $q(0,0) = 1$.

Состояние (В) соответствует процессу квазиравновесного упругопластического деформирования среды согласно уравнениям дифференциальной теории пластичности ассоциированной с потенциалом (1). Неубывающая функция $q(\vartheta, \omega) \geq 1$ описывает изотропное деформационное упрочнение. Возрастание повреждений в

материале происходит при активном процессе упругопластического деформирования, а их накопление описывается схемой линейного суммирования [8, 9]. Разрушение среды наступает при достижении поверхностью текучести (1) поверхности разрушения, представляемой следующим уравнением:

$$F_f(\sigma_{ij}, \dot{\epsilon}) = \tilde{\sigma}_i^2 + \frac{C_f}{f(\varphi)} \tilde{\sigma}_i + B_f \tilde{I} - A_f = 0. \quad (2)$$

Относительное расположение начальной поверхности пластичности (1) и поверхности разрушения (2) в пространстве девиатора напряжений осуществляется согласованным образом так, чтобы в зоне действия растягивающих напряжений разрушение не сопровождалось пластическими деформациями. Уровень необратимых деформаций при упругопластическом деформировании определяется, исходя из аппроксимации экспериментальной диаграммы деформирования следующей зависимостью:

$$\sigma_{Tc}(e_i) = \sigma_{Tc}^0 + \frac{3GC\Delta e_i}{C + \Delta e_i}, \quad (3)$$

здесь $\sigma_{Tc}(e_i)$ – интенсивность девиатора напряжений; σ_{Tc}^0 – начальный предел текучести, зависящий от вида напряженного состояния и первого инварианта тензора напряжений; G – модуль сдвига; Δe_i – интенсивность девиатора деформаций, отсчитываемая от предела упругости; C – константа аппроксимации.

Состояние (С), соответствующее поведению материала в разрушенном (фрагментированном) состоянии, описывается моделью упругопластического течения с поверхностью текучести следующего вида:

$$F_{pf}(\sigma_{ij}, I, \dot{\epsilon}) = \tilde{\sigma}_i + \frac{B_{pf} \tilde{I}}{1 - \gamma_f B_{pf} \tilde{I}} = 0. \quad (4)$$

В уравнениях (1)–(4) параметры $A_f, B_f, C_f; A_p, B_p, \gamma; C; B_{pf}, \gamma_f$ – являются функциями скорости деформаций $\dot{\epsilon}$. Для определения этих функций необходимы данные экспериментов по деформированию и разрушению лабораторных образцов при динамическом нагружении.

Состояние (ВС) соответствует неравновесному переходу от состояния (В) к состоянию (С) и сопровождается неравновесной релаксацией напряжений с поверхности (2) на поверхность (4). Зоны, занимаемые рассмотренными выше состояниями разносопротивляющихся сред при нестационарном деформировании, помечены на рис. 1 буквами **А, В, С, ВС**.

На рис. 2 представлены экспериментальные диаграммы квазистатического осевого сжатия бетона различной прочности [6] (сплошные линии) и их аппроксимации (штриховые линии). При динамическом нагружении в расчетах использовались аппроксимации ниспадающей (неравновесной) ветви диаграммы деформирования для малых, средних и высоких скоростей протекания процесса релаксации напряжений. Указанные кривые помечены на рис. 3 буквами **Л, М, Н** соответственно.

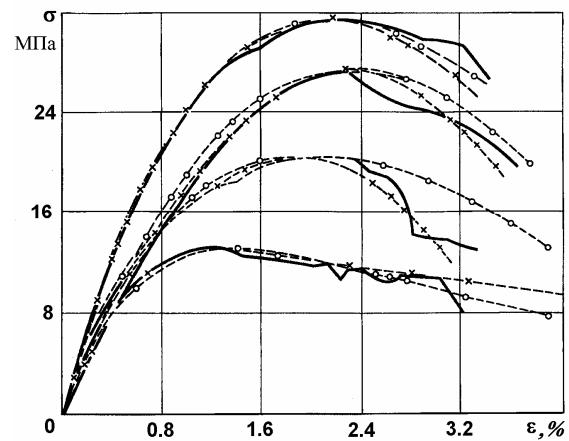


Рис. 2. Диаграммы осевого сжатия бетона различных классов

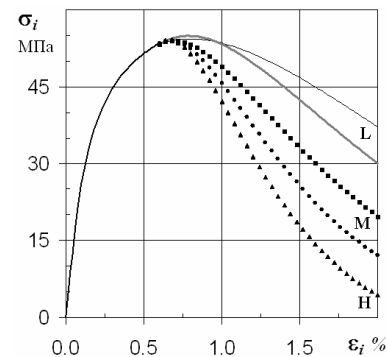


Рис. 3. Аппроксимация неравновесных ветвей диаграммы

Для изучения процессов проникания оживальных ударников в преграды из разносопротивляющихся сред авторами работы [10] были проведены две серии натурных экспериментов. В первой серии в качестве материала преграды была использована бетонная смесь из цемента, песка, кварцевого наполнителя и воды. Плотность застывшей бетонной смеси составила 2.04 г/см^3 . Во второй серии опытов в качестве материала преграды использовалась прочная бетонная смесь плотностью 2.25 г/см^3 с наполнителем из скальной породы. Мишени в экспериментах представляли собой стальные цилиндрические оболочки, залитые указанными бетонными сме-

сями и выдержанные до набора бетоном необходимого уровня прочности. В качестве ударников массой около 13 кг использовались стальные ударники с оживальной формой головной части. Геометрические характеристики мишеней и ударников приведены в [10].

В опытах замерялись величины перегрузок в ударниках и конечные глубины их проникания в преграды. Было проведено большое количество натурных испытаний, в которых варьировались начальные скорости соударения ударника с преградой от 140 до 460 м/с, величины прочности и плотности материала преграды. Заметного искажения остаточной формы ударников в большинстве экспериментов не наблюдалось.

Численное моделирование процессов соударения проводилось с использованием программного комплекса «UPSGOD» [11], в рамках которого осуществлена компьютерная реализация описанной выше модели деформирования и разрушения.

Основные результаты проведенных расчетов по верификации предлагаемой модели деформирования и разрушения относятся к сопоставлению расчетных и экспериментальных величин перегрузок и финальных глубин проникания ударников в преграду в зависимости от условий ударного взаимодействия. На рис. 4 приведено сравнение временных зависимостей расчетных перегрузок, возникающих в ударнике (в долях ускорения свободного падения g), с экспериментальными данными при скоростях соударения $V_1=200$ м/с и $V_2=314$ м/с.

Графики расчетных (сплошные линии) и экспериментальных (штриховые линии) перегрузок при внедрении жестких ударников в бетонные преграды с начальными скоростями удара V_1 в мишень малой прочности и V_2 в мишень большой прочности на рисунке помечены цифрами 1) и 2) соответственно. Экспериментальная и расчетная зависимости конечной глубины проникания ударника в прочный бетон от начальной скорости соударения показаны на рис. 5.

Удовлетворительное совпадение расчетных данных с экспериментом наблюдается во всем диапазоне скоростей соударения от 200 м/с до 400 м/с, рассмотренном в расчетах.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

- Предложенная модель динамического деформирования и разрушения описывает достаточно точно основные эффекты нестационарного ударного нагружения преград из бетона жесткими ударниками. Учитывая экспериментально установленные тенденции и корреляци-

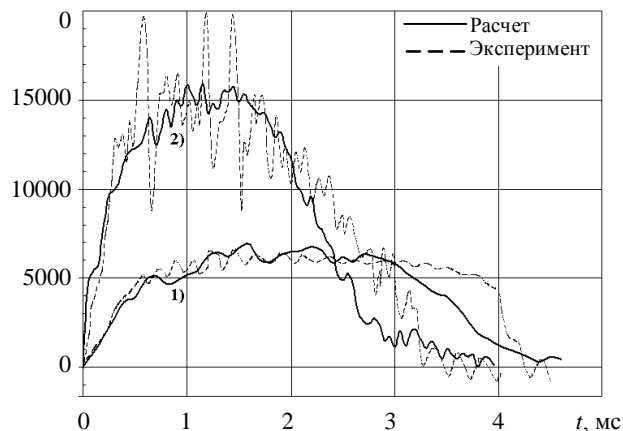


Рис. 4. Изменение перегрузок в ударнике

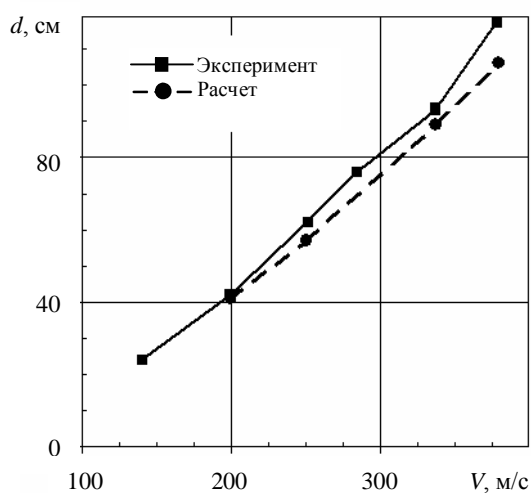


Рис. 5. Финальная глубина внедрения ударника

онные связи физико-механических констант и параметров малопластичных разнотвердых сред при динамическом деформировании, калибровку предложенной модели можно провести путем подбора ограниченного (3–5) числа параметров.

- Анализ решения задач внедрения жестких малодеформируемых ударников в мишени из бетона показывает, что максимум перегрузок достигается на начальной стадии соударения, соответствующей времени полного внедрения головной части ударника в преграду. При этом величина перегрузки пропорциональна интегральной силе сопротивления внедрению. На этой же стадии формируется характерная геометрическая структура повреждений материала преграды и зоны полностью фрагментированной среды.

Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (проекты 07-01-00257а; 08-08-97053).

Список литературы

1. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. М.: Наука, 1990. 215 с.
2. Драгон А., Мруз З. // Механика деформируемых твердых тел. Направления развития. М.: Мир. 1983. С. 163–188.
3. Матченко. Н.М., Трещев А.А. Теория деформирования разносопротивляющихся материалов. Тула: ТулГУ, 2000. 149 с.
4. Ломакин Е.В. // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10. № 4, 5. С. 41–52.
5. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении М.: Стройиздат, 1970. 272 с.
6. Карпенко Н.И. Общие модели механики бетона. М.: Стойиздат, 1996. 416 с.
7. Садырин А.И. // Межвуз. сб. Проблемы прочности и пластичности. Н.Новгород: Изд-во ННГУ. 2003. Вып. 65. С. 5–14.
8. Глушак Б.Л., Рузанов А.И., Садырин А.И. и др. Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1992. 192 с.
9. Фомин В.М., Гулидов А.И., Садырин А.И. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел // Новосибирск: Изд-во СО РАН. 1999. 600 с.
10. Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., et al. // Int. J. Impact Eng. 28 (2003) P. 479–497.
11. Абузьяров М.Х., Баженов В.Г., Крылов С.В. и

DYNAMIC PENETRATION OF RIGID STRIKERS INTO CONCRETE OBSTACLES

A.I. Sadyrin, S.V. Krylov, A.B. Batarin, S.A. Pirogov

The equations for a mathematical model of deformation and destruction of low-plastic hetero-resistant media under the action of dynamic loads have been presented. The model includes three ultimate surfaces dependent on three invariants of the stress tensor: a plasticity medium surface (plastic potential) with a partial damage of the structure, a destruction surface and a plasticity medium surface with a complete failure of structural strength. The model has been verified by comparing the calculation data with the full-scale experimental results on the penetration of rigid strikers into concrete obstacles. The analysis of the numerical simulation has revealed a number of peculiarities of impact interaction between rigid strikers and concrete obstacles as a function of the impact conditions.

др. // ЖВМиМФ. 2000. Т. 40. № 6. С. 940–953.