

Л. В. Прохорец /к. т. н./
Институт геотехнической механики
им. Н. С. Полякова НАН Украины

Экспериментальные исследования прочностных свойств горных пород методом ударного импульса

Представлены результаты по развитию метода ударного импульса для экспресс-контроля прочности горных пород и элементов геокомпозитных конструкций путем установления закономерностей ударного взаимодействия упругого тела с горными породами и элементами геокомпозитных конструкций. (Ил. 2. Табл. 3. Библиогр.: 5 назв.)

Ключевые слова: метод ударного импульса, длительность ударного импульса, прочность горных пород, твердеющие растворные смеси.

The results for the development of shock pulse method for express control of rock strength and elements of geocomposite structures by establishing objective laws of elastic body shock interaction with rocks and elements of geocomposite structures are presents.

Key words: shock pulse method, duration of the shock pulse, strength of rocks, hardened mortars mixtures.

Актуальность проблемы

Одним из ключевых моментов в сложном процессе добычи полезных ископаемых является обеспечение устойчивости подземных горных выработок различного назначения, откосов карьеров, других подземных и заглубленных объектов. Расчет устойчивости обнажений массива горных пород, крепей и охранных конструкций, как правило, осуществляется по действующим государственным или отраслевым нормативно-техническим документам, ведомственным инструкциям и методикам. В основе расчетов по любому из указанных документов лежит информация о физико-механических свойствах горных пород, руд, углей и т. д. При этом основными показателями служат прочностные и, в меньшей мере, упругие характеристики, сведения о которых получают на стадии геологоразведочных работ путем лабораторных испытаний кернового материала. В некоторых случаях такую информацию дополняют данными лабораторных механических исследований проб горных пород, выборочно отобранных в горных выработках на стадии разработки месторождения.

Анализ данных о физико-механических свойствах пород показал, что коэффициент вариации прочности в пределах одного литотипа на одном и том же месторождении может достигать нескольких сотен процентов. Кроме того, современные технологии поддержания выработок, например опорно-анкерное крепление, превращают массив в геокомпозитную конструкцию, прочностные свойства которой, как и

любого композита, существенно отличаются от свойств каждого из элементов такой конструкции. Это означает, что обеспечить безопасность и низкую стоимость поддержания выработок и других обнажений горного массива можно только путем системного и массового его опробования. Однако сгустить сетку опробования не позволяют технические возможности, а также высокая стоимость и трудоемкость бурения и механических испытаний.

В строительной индустрии, где требования к устойчивости сооружений намного жестче и выше, такая проблема решается использованием ряда нормативных методов неразрушающего контроля бетона и других строительных материалов. При этом наиболее достоверные результаты обеспечивает метод ударного импульса, получивший наибольшее распространение для контроля бетонных и железобетонных конструкций [1; 2].

Цель работы

Развитие метода ударного импульса применительно к экспресс-контролю прочности породного массива и элементов геокомпозитных конструкций, учитывающее особенности и закономерности распространения ударного импульса в горных породах, что позволяет выполнять массовые измерения в условиях естественного залегания, является актуальной научной задачей, имеющей важное значение для повышения безопасности и увеличения срока эксплуатации выработок и геокомпозитных конструкций.

Результаты исследований

Сущность метода заключается в следующем: боек, имеющий сферическую поверхность ударника, ударяется о поверхность объекта, при этом вся энергия удара (не считая тепловых потерь) расходуется на упругие и пластические деформации исследуемого материала. В результате пластических деформаций образуется лунка, а упругих – возникает реактивная сила F .

Чем выше пластические свойства среды, тем большая часть энергии удара расходуется на пластические деформации, увеличивается время действия удара и уменьшаются ее прочностные свойства. И наоборот, чем выше упругие свойства, возрастает величина силы F , сокращается время действия удара и увеличивается прочность материала. Т. е. при нормированном ударе величина реактивной силы F и длительность действия удара могут служить показателями прочности исследуемого объекта, по которому наносится удар. Однако измерить силу F и время действия удара прямым путем технически сложно.

Для измерения этих величин в конструкцию бойка включен электромеханический преобразователь, который механическую энергию удара преобразует в электрический импульс. Амплитуда A будет пропорциональна силе F , а время t пропорционально длительности действия удара. Следовательно, амплитуда A и время t могут служить косвенными характеристиками прочности бетона или горной породы [3; 4].

Нами были проведены экспериментальные исследования зависимости длительности ударного импульса от прочностных свойств геоматериалов и твердеющих растворных смесей. Исследования были выполнены на образцах основных литотипов горных пород Западного района Донбасса (уголь, песчаник, аргиллит, алевролит), Артемовского гипсового и Криворожского железорудного месторождений, а также наи-

более широко применяемых в горном деле геокomпозитных материалах.

Для настоящего исследования пробы горных пород отбирались в виде кернов, из которых потом резались образцы в виде кубиков с ребром 100 мм с помощью специального камнерезного оборудования. Поверхность образцов была тщательно отшлифована на шлифовальном диске, поскольку она контактирует с рабочими органами пресса при испытаниях образцов на одноосное сжатие. При этом должна соблюдаться параллельность противоположных граней образцов, контактирующих с плитами пресса.

Первый этап эксперимента – это определение длительности ударного импульса подготовленных образцов горных пород. Он проходил следующим образом: по одной из граней образца наносилась серия из 20 ударов с помощью разработанной в ИГТМ НАНУ аппаратуры «ДИКОН», на индикаторе которой фиксировались значения длительности. Затем из всех значений определяли среднее, что и было длительностью ударного импульса исследуемого образца. Количество образцов одной категории геоматериалов для данных испытаний должно быть не менее 6.

Второй этап эксперимента – это определение прочности образцов горных пород. Испытания образцов на одноосное сжатие выполняли с использованием пресса ПСУ-50 в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 [5]. После обработки результатов по каждой из категорий геоматериалов получено поле значений, отображающее зависимость «длительность ударного импульса – прочность на одноосное сжатие», и вычислены уравнения регрессии. В качестве примера на рис. 1 представлена экспериментальная зависимость исследуемых параметров для песчаника.

В совокупности для всех испытанных разновидностей геоматериалов наилучшее приближение аналитической зависимости к экспери-

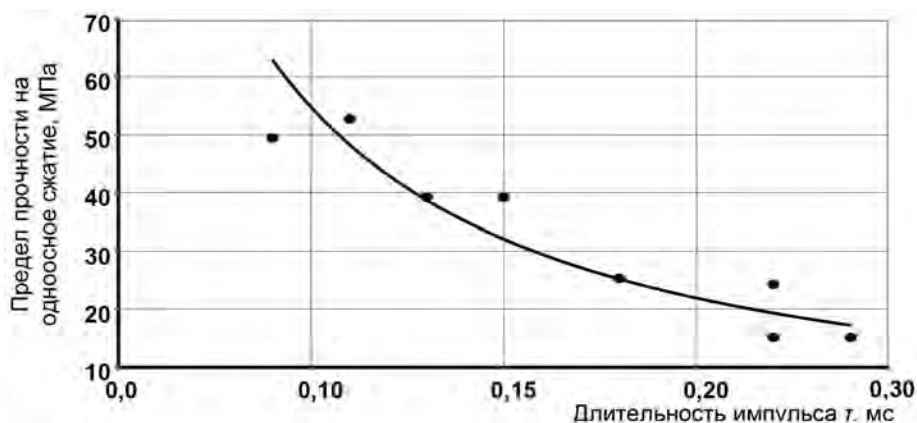


Рис. 1. Экспериментальная зависимость между длительностью ударного импульса и пределом прочности на одноосное сжатие для песчаника

ментальным данным обеспечивается при использовании степенной функции вида:

$$\sigma_{сж.} = at^{-b}, \quad (1)$$

где $\sigma_{сж.}$ – предел прочности на одноосное сжатие; t – длительность ударного импульса; a и b – коэффициенты, являющиеся характеристикой геоматериала.

Уравнения регрессии, в соответствии с аналитической зависимостью (1) представлены в табл. 1.

Важную роль при формировании геокомпозитных конструкций играют различные твердеющие смеси. Поэтому были исследованы смеси на основе цементного вяжущего, с целью установления информативности метода для контроля динамики твердения растворной смеси. Также рассматривались варианты с добавлением к базовой смеси различных добавок: «Спрайкон», хлористый кальций $CaCl_2$, «Центрамент НЗ» (пластификатор), глина.

Для укрепления пород наиболее распространены сравнительно дешевый материал – цементный раствор. В большинстве случаев применяют портландцемент, а при наличии агрессивных подземных вод используют агрессивно-устойчивые цементы: пуццолановый, шлакопортландцемент и другие. Для регулирования свойств тампонажных растворов (сроки схватывания, седиментационная устойчивость, водопроницаемость) применяют добавки-активаторы: хлорное железо, хлористый кальций, силикат натрия.

Добавление в раствор бентонитовой глины в количестве 5%-ной массы песка увеличивает в 3-4 раза время оседания твердых частиц. Поэтому при тампонировании пустот закрепного пространства целесообразно использовать для приготовления раствора пески, содержащие включения глинистых частиц, что способствует улучшению перекачиваемости смеси. Однако повышенное содержание в растворе глины (свыше 10 %) приводит к снижению прочности тампонажного камня.

Нами в работе была использована добавка «Спрайкон». Данная добавка базируется на портландцементе, армирована волокнами и по-

лимерами и предназначена для восстановления вертикального и потолочного разрушенного бетона. «Спрайкон», главным образом, применяется при восстановлении бетона, легко применим для разного типа трещин. Предел прочности при сжатии через 28 дней может достигать 44 МПа.

Также для приготовления исследуемых образцов нами была использована добавка-пластификатор, модифицированное поверхностно-активное вещество «Центрамент НЗ». Эта добавка существенно снижает расход воды в бетонной смеси, повышает ее подвижность, придает большую однородность бетонной смеси и улучшает ее укладываемость.

Варианты составов сухой смеси для приготовления раствора представлены в табл. 2.

На следующем этапе эксперимента определялась длительность ударного импульса исследуемых образцов из твердеющих смесей на различных этапах их твердения. Затем проводились испытания образцов на одноосное сжатие с использованием пресса ПСУ-10 в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 [5]. Обработка результатов производилась таким же образом, как и для образцов геоматериалов, описанным ранее.

В отличие от геоматериалов, при исследовании твердеющих смесей был охвачен диапазон с невысокими значениями прочности. Однако и в данном случае установлено наличие корреляционной зависимости между прочностью и длительностью ударного импульса, что иллюстрируется рис. 2.

Уравнения регрессии для массивов данных по твердеющим смесям на основе цементного вяжущего представлены в табл. 3.

Выводы

В результате выполненных экспериментальных исследований в лабораторных условиях на различных геоматериалах и твердеющих растворных смесях установлено наличие тесной корреляционной связи между двумя массивами данных: значениями длительности ударного импульса и пределом прочности на одноосное сжатие. Достоверность полученных уравнений регрессии находится в пределах 0,81–0,92. Это показывает возможность использования ме-

Таблица 1

Уравнения регрессии для описания зависимости прочности пород от длительности ударного импульса

Исследуемый геоматериал	Уравнение регрессии	Достоверность уравнения
Гипс	$\sigma_{сж.} = 3,4404t^{-1,3402}$	0,8218
Уголь	$\sigma_{сж.} = 7,7731t^{-1,0605}$	0,8157
Песчаник	$\sigma_{сж.} = 2,614t^{-1,3213}$	0,8788
Алевролит	$\sigma_{сж.} = 0,0375t^{-3,8711}$	0,8396
Железистый кварцит	$\sigma_{сж.} = 1,5775t^{-2,572}$	0,9
Магнетито-амфиболитовый сланец	$\sigma_{сж.} = 4,9694t^{-1,659}$	0,92

Варианты составов сухой смеси для приготовления раствора

№ смеси	Массовая доля компонентов, %						
	Цемент ПЦ 400-Д5	Песок кварцевый	Глина комовая	«Спрайкон»	CaCl ₂	«Центрамент НЗ»	Фибра ВСМ-18
1	25,0	75,0	-	-	-	-	-
2	21,0	75,0	-	4,0	-	-	-
3	19,0	75,0	-	6,0	-	-	-
4	16,0	75,0	-	4,0	-	-	5,0
5	23,0	75,0	-	-	2,0	-	-
6	22,5	75,0	-	-	2,5	-	-
7	23,0	75,0	-	-	-	2,0	-
8	25,0	50,0	25,0	-	-	-	-

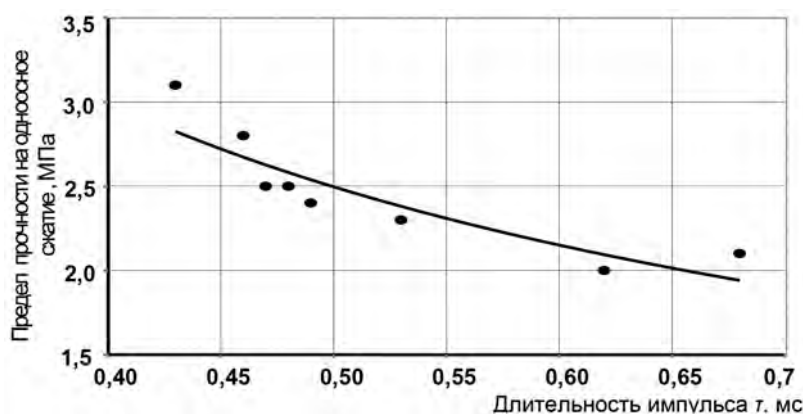


Рис. 2. Зависимость между длительностью импульса и пределом прочности на сжатие для твердеющей водо-песчано-цементной растворной смеси

Таблица 3

Уравнения регрессии для описания зависимости прочности твердеющих смесей на основе цемента от длительности ударного импульса

Исследуемая смесь	Уравнение регрессии	Достоверность уравнения
Водо-цементно-песчаная без добавок	$\sigma_{сж.} = 1,4154\tau^{-0,8189}$	0,8225
Водо-цементно-песчаная с добавкой хлористого кальция	$\sigma_{сж.} = 1,5417\tau^{-0,9147}$	0,8971

тогда ударного импульса в новом варианте, с неиспользуемым ранее информативным параметром – длительностью ударного импульса для оценки прочности геоматериалов и твердеющих растворных смесей, которые широко используются при создании геокомпозитных конструкций.

Библиографический список

1. ДСТУ БВ.2.7-223:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій: Чинний від 2010-09-01. - К.: Мінрегіонбуд України, 2010. - 12 с.
 2. ДСТУ БВ.2.7-220:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю: Чинний від 2010-09-01. - К.: Мінрегіонбуд України, 2010. - 20 с.

3. Экспресс-оценка прочности горных пород в массиве методом ударного импульса / С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук, В. Н. Сергиенко, Л. В. Прохорец // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2013. - № 2. - С. 74-77.

4. Методические рекомендации по экспресс-определению упругих и прочностных свойств необработанных образцов горных пород и элементов геокомпозитных конструкций методами неразрушающего контроля / А. Ф. Булат, Т. А. Паламарчук, С. И. Скипочка [и др.]. - Днепрпетровск: Монолит, 2011. - 48 с.

5. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии: Введен 1986.07.01. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 10 с.

Поступила 30.06.2016