И.В.БЕЛИНСКИЙ, В.В.ГРЖИБОВСКИЙ, В.А.ЛЕМЕШКО
Отделение геодинамики взрыва ИГФ НАНУ,
Киев, Украина

СОЛИТОНЫ И ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРИРОВАННЫХ СРЕД

Введение. Реальные горные породы отличаются разнообразной неоднородностью строения, поэтому проблема определения свойств таких сред является не менее актуальной, чем проблема их разрушения.

В [2,3,11] изложены новые сейсмические методы диагностики как крупных разломов, так и небольших трещин между блоками скальной породы. Эти методы пригодны для диагностики единичных нарушений горного массива. Диагностика сред регулярной структуры упругими волнами фактически заменяет структурированную среду на однородную с усредненными значениями упругих констант. Более того, по результатам измерений особенностей распространения упругих волн в структурированной среде невозможно однозначно определить ее характерные размеры. Следовательно, такими методами принципиально невозможно определить характерные размеры структуры периодической среды.

Современные исследования свидетельствуют, что внутренняя структура среды приводит к нелинейным волновым движениям [6,7,9,10,13-15]. Так, генерированным мощными импульсными нагружениями Р-волнам присущи свойства солитонов [8,12]. Волны, генерированные мощными землетрясениями, также обладают свойствами солитонов, что может быть связано с блочной структурой земной коры [12].

Таким образом, целью представленных исследований является экспериментальное определение устойчивых параметров солитонов в средах периодической структуры, а также исследование процесса отражения солитона от дефекта в периодической структуре для диагностики среды и дефекта в ней.

Постановка эксперимента. Методика проведения эксперимента описана в работах [1,5]. Отметим здесь лишь отличия, которые касаются данного исследования. На дюралюминиевой направляющей были установлены стальные шары диаметром d = 41,25 мм. В этой цепочке шаров на некотором удалении от ее начала размещались два шара-датчика и дефект структуры в виде шара диаметром меньше диаметра шара в цепочке. Центровка шара дефекта осуществлялась путем размещения его в диске диаметром 41,25 мм и толщиной 1 мм, изготовленного из полихлорвинила. В качестве датчиков использовались шары диаметром 41,25 мм, внутри которых размещался чувствительный элемент из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 9,8 мм и толщиной 1 мм. Для этого два шара были разрезаны электроискровым методом (толщина разреза составляла 30-40 мкм). В разрезанных половинках вытравливалось углубление, где и размещался чувствительный элемент. После этого половинки шара склеивались эпоксидной смолой.

Сигналы от датчиков через согласующие усилители заряда поступали на двухканальный цифровой осциллограф TDS-210 фирмы «Tektronix» с коммутационным модулем TDS-2CM, что позволило при помощи программы WSTRO, записывать данные в персональный компьютер.

Для получения полной картины эволюции возмущения в длиной цепочке шаров, вызванной ударом массой, которая изменялась от 4 до 349 % массы шара в цепочке, а также изучения особенностей отражения возмущения от дефекта в структуре датчики-шары последовательно занимали положение во всей цепочке при одинаковой скорости удара. Скорость удара изменялась от 0,16 до 2,8 м/с. Надежный механический контакт между шарами цепочки осуществлялся ее статическим поджатием силой ~3-5 Н с помощью пружины, устанавливаемой в конце цепочки шаров.

Обсуждение результатов. В [1,5] подробно обсуждалась эволюция возмущения в длинной цепочке шаров одинакового размера при ее механическом нагружении с различными амплитудно-временными параметрами. Там было установлено, что при ударе по цепочке массой M, равной и меньшей массы шара в цепочке, в ней возникает один солитон. А при ударе по ней цепочкой из N шаров в ней возникает N солитонов.

На рис.1 представлены зависимости пространственной полуширины всех солитонов, которые возникают в длинной цепочке шаров при ударе, от их амплитуды. Приведенные результаты убедительно свидетельствуют о том, что пространственная полуширина λ всех без исключения солитонов, возникающих в цепочке шаров при ударе, не зависит от их амплитуды,

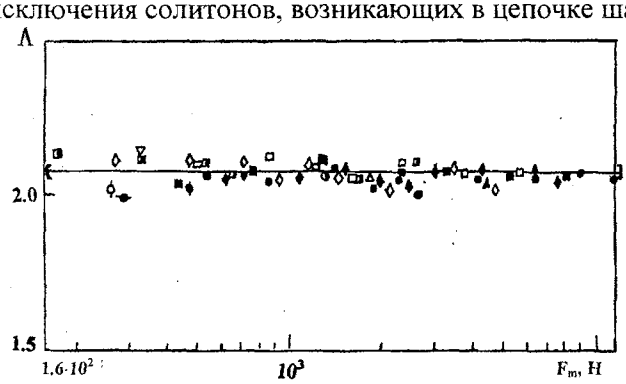


Рис.1. Зависимость пространственной полуширины солитонов, распространяющихся в цепочке стальных шаров, от их амплитуды. Точками обозначены все солитоны, которые возникают в цепочке шаров при ударе

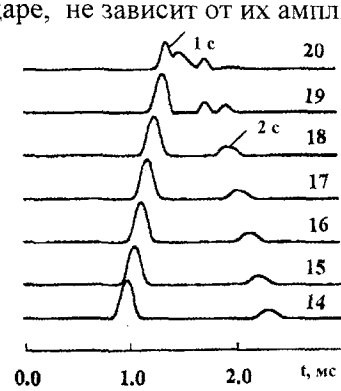


Рис.2. Эволюция падающего (1с) и отраженного (2с) солитонов

которая изменяется почти на два порядка, и составляет $\lambda/d = 2{,}076$. Доверительный интервал этой зависимости $\Delta = 0{,}7\,\%$ при доверительной вероятности $P = 0{,}95$.

Таким образом, периодическая структурированная среда формирует устойчивый способ передачи информации и энергии через себя посредством солитона, который формируется четырьмя элементами. При этом пространственная полуширина солитона выступает в качестве устойчивого параметра, по которому однозначно определяется характерный размер элемента периодической среды.

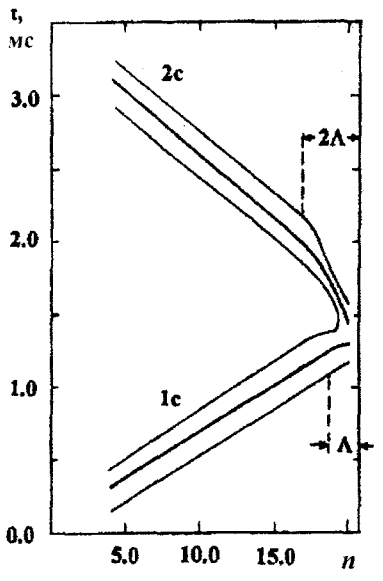


Рис.3. Годограф падающего (1с) и отраженного (2с) солитонов

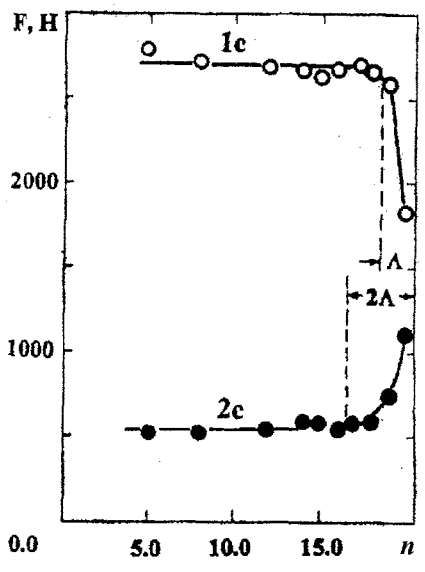


Рис.4. Амплитуда падающего (1с) и отраженного (2с) солитонов

Ниже обсуждаются результаты взаимодействия солитона, распространяющегося в длинной цепочке шаров, с дефектом структуры в виде шара меньшего диаметра. На рис.2, 3, 4 представлены параметры падающего и отраженного солитонов при ударе со скоростью 0,7 м/с. В качестве дефекта структуры на 21-й позиции размещался стальной шар диаметром $d = 9{,}5$ мм.

Приведенные результаты убедительно доказывают, что дефект в периодической среде формирует отраженный солитон. При этом формирование отраженного солитона завершается на 4-м шаре от дефекта, т.е. на расстоянии пространственного размера солитона. Амплитуда сформированного солитона в 4,74 раза меньше амплитуды падающего солитона. После формирования солитон сохраняет свою форму и амплитуду вдоль всей цепочки шаров за исключением двух первых шаров. Относительная пространственная полуширина отраженного солитона составляет $\lambda/d = 2{,}02$ ($\Delta = 2{,}0\,\%$, $P = 0{,}95$). Отметим здесь, что отраженный солитон, как и падающий, формируется четырьмя элементами периодической среды, по которой он распространяется.

Таким образом, по известным параметрам падающего и отраженного от дефекта солитонов, которые измеряются разработанным авторами специальным устройством [4], легко определить место расположения дефекта в периодической структурированной среде.

Для конкретной идеальной среды периодической структуры (цепочки шаров) удалось установить взаимосвязь амплитуды отраженного солитона с размером дефекта в виде шара. Эта зависимость иллюстрируется рис.5. Как видно из приведенных данных, существует устойчивая связь между амплитудой отраженного солитона и размером дефекта в цепочке шаров.

Таким образом, амплитуда отраженного от дефекта солитона несет информацию о его размере.

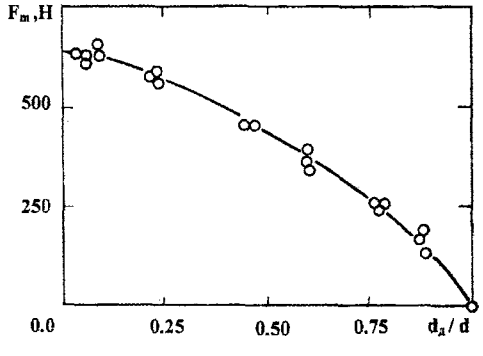


Рис.5. Зависимость амплитуды отраженного солитона от размера дефекта

Заключение. Выполненные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

• Пространственная полуширина падающего или отраженного солитона выступает в качестве устойчивого параметра, по которому однозначно определяется характерный размер элемента периодической среды.

• По измеренным значениям фазовых скоростей падающего и отраженного солитонов определяется место расположения дефекта в периодической структурированной среде.

• Амплитуда отраженного от дефекта солитона несет информацию о его размере.

Исследования проводились при финансовой поддержке Научно-технологического центра в Украине (Science and Technology Center in Ukraine), проект № 1255.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белинский И.В.* Экспериментальное исследование особенностей распространения импульсных возмущений в гранулированных средах / И.В.Белинский, В.В.Гржибовский, В.А.Лемешко // Физические проблемы взрывного разрушения массивов горных пород. М., 1999. С. 185-189.

2. *Костюченко В.Н.* Экспериментальное изучение прохождения сейсмических волн через трещины / В.Н.Костюченко, С.М.Ладнушкин // Известия РАН. Физика Земли. 1996, № 118.

3. *Кочарян Г.Г.* Экспериментальное исследование свойств блочного массива скальных пород после воздействия накладного взрыва ВВ мощностью 5 т // Физические проблемы взрывного разрушения массивов горных пород. М., 1998. С. 115-119.

4. *Белінський І.В.* Пристрій для формування та реєстрації солітонів в середовищі періодичної структури та спосіб діагностики структурованих середовищ / І.В.Белінський, В.А.Даниленко, В.В.Гржибовський, В.А.Лемешко. Заяка на винахід. № 2000042082 від 11.04.2000 р.

5. *Belinsky I.V.* Peculiarities of dynamics of granular and block media / I.V.Belinsky, V.A.Danilenko and other // Deformed media and impulse loads; Kiev: Naukova Dumka, 1992, p.3-11 (Russ).

6. *Bereznev I.A.* Experimental investigations of nonlinear seismic effects / I.A.Bereznev and A.V.Nikolaev // Phys. Earth Planetary Int. 1988. V. 50. P. 83-87.

7. *B.P.Bonner.* Acoustic nonlinearitis produced by a single macroscopic fracture in granite / B.P.Bonner and B.J.Wanamaker // Review of Progress in Quantitative NDE, edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum, New York. 1992.Vol. 10B, 1861-1867.

8. *Gamburtseva N.G.* Soliton properties of teleseismic wave / N.G.Gamburtseva, A.V.Nikolaev, A.B.Khavroshkin and V.V.Tsyplakov // Transactions (Doklady) of the USSR Akademy of Sciences, Earth Science Section. 1986. 291, № 4, 30-32.

9. *Johnson P.A.* Nonlinear generation of elastic waves in crystalline rock / P.A.Johnson, T.J.Shankland, R.J.O'Connell and J.N.Albright // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, 3597-3602.

10. *Johnson P.A.* Observation and implications of nonlinear elastic wave response in rock / P.A.Johnson and K.R.McCall // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21, 165-168.

11. *Kocharyan G.G.* Structure of various scale natural rock discontinuities and their deformation properties / G.G.Kocharyan, V.N.Kostyuchenko, D.V.Pavlov. // Int. J.Rock Mech & Min Sci. 1997, 34 (3/4) paper. N. 159.

12. *Lund P.* // Pure and Applied Geophysics. 1983. V.121. № 1.

13. *Ostrovsky L.A.* Wave processes in media with strong acoustic nonlinearity // J. Acoust. Soc. Am., 1992. V. 90, 3332-3337.

14. *Rodionov N.V.* The feature-store of geomechanics. Moscow: Nauchnyi Mir, 1996 (Russ.)

15. *Sadovsky M.A.* Seismic process in block medium / M.A.Sadovsky and G.F.Pisarenko. Moscow: Nauka. 1991 (Russ.)