

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТА НА ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ МЕЖБЛОКОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А.М. Будков, Г.Г. Кочарян

Рассмотрена численная реализация расчетной модели воздействия сейсмических колебаний на напряженный контакт блоков горной породы. Проведенные численные эксперименты продемонстрировали, что специфическая реология нарушений сплошности приводит к возникновению остаточных перемещений берегов даже при весьма малых по сравнению с прочностью геоматериала амплитудах воздействия. Показано, что скорость накопления остаточных деформаций существенно возрастает по мере приближения частоты внешних низкоамплитудных воздействий к собственной частоте блочной структуры и слабо зависит от расположения контактных пятен на границе раздела. В случае, если нарушение сплошности может быть представлено как чередование плоскостей скольжения и залеченных участков («перемычек»), учет эффектов дилатансии при разрушении «перемычек» приводит к замедлению процесса накопления остаточных сдвиговых межблоковых деформаций при внешних низкоамплитудных воздействиях.

Введение

Предложенная Г.Дж. Мелосом модель «акустической флюидизации» [Melosh 1979] впервые продемонстрировала возможный механизм трансформации микросейсмических колебаний в макроскопически организованное движение блочной среды. Экспериментально возможность подобного процесса была показана в работах [Кочарян и др., 1988; Соболев и др., 1991, 2003], а в численном эксперименте – в работе [Кочарян и др., 1990]. Неспособные в силу малости амплитуды вы-

звать деформацию геоматериалов, слагающих блоки, низкоамплитудные колебания могут оказаться одним из наиболее важных факторов, определяющих возникновение и развитие деформационных процессов в земной коре из-за нетривиального свойства блочной структуры – способности накапливать результаты воздействия ничтожных по величине силовых полей. Эта возможность обусловлена нелинейностью деформационных характеристик межблоковых разломных зон в области малых деформаций [Костюченко и др., 2002].

Соотношения, пригодные для описания деформационных характеристик межблоковых контактов, могут быть получены лишь из эксперимента. Выполненные лабораторные опыты позволили в деталях исследовать закономерности динамического деформирования трещин различных типов [Костюченко и др., 2002], оценить влияние скорости деформирования [Кочарян и др., 2008] и значимость процессов восстановления прочности [Кочарян и др., 2007]. Проведение экспериментов со взрывами разного масштаба дало возможность определить характеристики разломов и трещин в условиях естественного залегания и сопоставить закономерности деформирования натурных объектов с образцами лабораторного масштаба [Кочарян и др., 2003]. В последние два десятилетия стали доступны качественные данные наблюдений, получаемые с развернутых цифровых сетей широкополосных сейсмических наблюдений, позволяющие вести перманентный мониторинг процессов в разломных зонах. Использование этих данных, а также результатов лабораторных опытов и полевых экспериментов, позволило построить феноменологическую модель воздействия сейсмических колебаний на напряженный горный массив [Кочарян и др., 2004], а на её основе и численную модель [Будков, 2006].

Типичная реологическая зависимость «сдвиговое напряжение – перемещение» схематично показана на рис. 1 сплошной линией. Характерными точками этой диаграммы являются пиковое перемещение u_p – точка достижения предельной прочности на сдвиг τ_p , а также смещение u_r , при котором прочность выходит на остаточное значение τ_r . Эти параметры, как и отношение τ_p/τ_r , изменяются в довольно широких пределах и зависят от таких факторов, как шероховатость контакта, прочность поверхности, свойства материала-заполнителя, P – T условия и т.д. При этом величина u_p составляет 10^{-2} – 10^{-3} от характерного размера сдвигаемого блока, а вы-

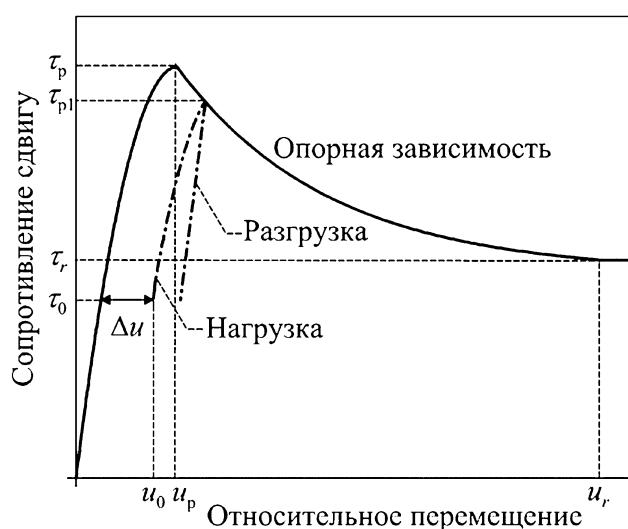


Рис. 1. Типичная реологическая зависимость для сдвигового деформирования контакта между блоками горной породы и схема к построению расчетной модели.

ход на остаточное значение прочности происходит при очень больших сдвиговых смещениях $u_r \sim 100u_p$.

Предложенная модель была реализована в рамках двумерного вычислительного кода [Архипов и др., 2002], разработанного на основе лагранжева численного метода «Тензор» [Майнчен и др., 1967].

Уравнения, описывающие движение и напряженное состояние твердого деформируемого материала в декартовой системе координат, имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0, \quad v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \\ \rho \frac{dv_x}{dt} - \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial x} &= 0, \\ \rho \frac{dv_y}{dt} - \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} &= g, \\ \rho \frac{d\varepsilon}{dt} - s_{xx} \dot{\varepsilon}_{xx} - s_{yy} \dot{\varepsilon}_{yy} - s_{zz} \dot{\varepsilon}_{zz} - 2s_{xy} \dot{\varepsilon}_{xy} - \frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где t – время; x, y, z – координаты (оси x и y лежат в плоскости симметрии задачи, ось z – перпендикулярна этой плоскости); ρ – плотность; v_x, v_y – компоненты вектора скорости $\mathbf{v}$; g – ускорение свободного падения; P – давление; s_{ij} – девиатор тензора напряжений; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – девиатор тензора скоростей деформаций; ε – удельная внутренняя энергия; d/dt – лагранжева производная по времени:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) f.$$

Система уравнений движения замыкается соотношениями, определяющими связь между напряжениями и деформациями материала. В общем случае это могут быть уравнения состояния жидкости или газа, соотношения идеальной упругости или какая-либо более сложная модель деформирования геоматериалов.

В рамках лагранжева подхода исследования процесса сдвигового деформирования нарушений сплошности реализованы с помощью задания на контакте блоков специального граничного условия – контактной границы с проскальзыванием. При этом тангенциальные компоненты тензора напряжений на контактной границе определяются с помощью выбранной для проведения расчета данного участка границы модели сдвигового деформирования межблокового контакта.

Механику накопления остаточных деформаций при низкоамплитудных воздействиях оставим здесь без обсуждения, поскольку она достаточно подробно рассмотрена в наших недавних публикациях [Кочарян и др., 2004, 2005, 2006; Будков и др., 2010]. В настоящей работе рассмотрены вопросы влияния частоты сейсмических колебаний и эффектов дилатансии на динамику процесса накопления относительных межблоковых подвижек.

Постановка задачи и обсуждение результатов

Постановку задачи иллюстрирует рис. 2. Рассматривается система из двух одинаковых блоков высотой $L/2$ и длиной L . Нижний блок B – неподвижный. На верхней и боковых гранях верхнего (подвижного) блока A задавалось граничное условие свободной поверхности. Межблоковый контакт моделировался зоной ослабленной

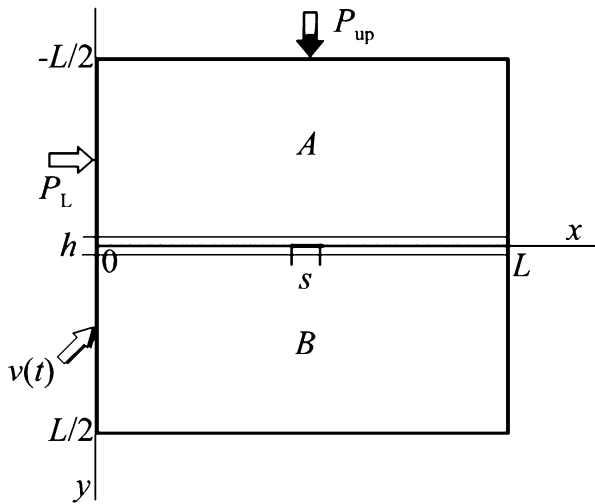


Рис. 2. Постановка задачи.

породы толщиной $h = 10$ м с плоскостью скольжения посередине. Известно, что реальный контакт двух скальных поверхностей представляет собой совокупность контактных пятен, суммарная площадь которых составляет лишь относительно небольшую долю от общей площади границы. В соответствии с этим граничное условие на плоскости скольжения задавалось двух типов: скольжение с трением на участке границы протяженностью s (контактное пятно) и идеальное скольжение на всей остальной границе. Для расчета участка границы с трением использовалась модель, учитывающая нелинейность реологических характеристик нарушений сплошности [Кочарян и др., 2003]. Предельная прочность нарушения на сдвиг τ_p определялось с помощью соотношения:

$$\tau_p = \sigma_n \operatorname{tg} \left[JRC \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right], \quad (2)$$

где σ_n – нормальное напряжение в окрестности границы, ϕ_r – остаточный угол трения. Остаточная прочность $\tau_r = \tau_p/2$. Параметр u_p (предельное перемещение) варьировался от 8 до 50 см.

Расчет проводился в три этапа. На первом этапе расчета на верхней грани блока A задавалось постоянное граничное давление $P_{ур} = 50$ МПа и решалась задача на установление. Для заданного значения $P_{ур}$ и выбранных характеристик трещины $\tau_p = 35$ МПа. После этого, на втором этапе расчета на левой боковой грани блока A добавлялось сдвигающее усилие в виде граничного давления P_L . Для того, чтобы избежать больших пиковых ускорений при включении сдвигающей нагрузки, функция $P_L(t)$ задавалась в виде:

$$P_L = \begin{cases} P_0 \cdot t/t_0 & \text{при } t < t_0, \\ P_0 & \text{при } t \geq t_0. \end{cases} \quad (3)$$

Амплитуда нагрузки P_0 выбиралась так, чтобы создавать сдвигающее усилие, близкое к «мобилизованной» величине напряжения сопротивления сдвигу на участке остаточной прочности. В серии расчетов с блоком высотой 500 м ($L = 1000$ м) и контактным пятном размером $s = 20$ м было задано $P_0 = 0,67$ МПа. При увеличе-

нии высоты блока до 1000 м величина P_0 была уменьшена в 2 раза. Время нарастания t_0 варьировалось в зависимости от размеров блока, и для блоков длиной 1000 м и более задавалось равным 500 мс.

На третьем этапе расчета на левой грани блока B задавалось граничное условие, моделирующее распространение под углом 45° к плоскости межблокового контакта сейсмической волны, скорость движения среды в которой определялась соотношением

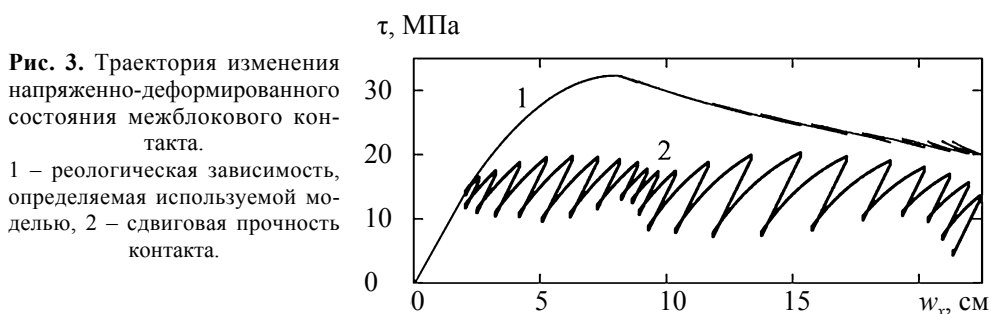
$$v = v_0 \sin(2\pi ft). \quad (4)$$

Во всех расчетах амплитуда волны $v_0 = 0,01$ м/с.

При изучении особенностей воздействия сейсмических волн малой амплитуды на блочную среду учет прочностных характеристик геоматериалов не существен. Поэтому при проведении расчетов для описания процесса деформирования материала блоков использовались соотношения идеальной упругости. Упругие характеристики материала блоков взяты типичными для скальных пород: плотность $\rho_0 = 2,7$ г/см³, скорость продольных волн $a_0 = 4$ км/с, скорость поперечных волн $b_0 = 2$ км/с. В зоне ослабленной породы вблизи межблокового контакта: $\rho_0 = 2,5$ г/см³, $a_0 = 2$ км/с, $b_0 = 0,8$ км/с.

Специально проведенные расчеты с учетом и без учета зоны ослабления показали, что наличие зоны ослабленной породы вблизи контактной границы слабо влияет на динамику накопления межблоковых подвижек при слабых воздействиях.

Рассмотрим данные, полученные в серии расчетов с блоками протяженностью $L = 1000$ м. Расчеты показали, что в результате слабого сейсмического воздействия возникает медленное перемещение блока A вдоль контактной границы. Причем это движение не связано с флуктуациями нормальной компоненты напряжения на границе, которые очень незначительны. Процесс накопления деформаций можно проследить по данным рис. 3 на котором показан график изменения сдвиговой прочности контакта в зависимости от величины относительного перемещения блоков, полученный в расчетном варианте с $u_p = 8$ см и $f = 1,7$ Hz. Там же приведена опорная кривая, определяемая используемой в модели реологической зависимостью. Локальные экстремумы на ниспадающей ветви опорной кривой обусловлены как раз изменениями нормальной компоненты напряжения на контактной границе.



В соответствии с используемой моделью в результате асимметрии цикла нагрузка–разгрузка при наличии сдвигающего усилия образуется незамкнутая гистерезисная петля, то есть возникает остаточное межблоковое перемещение. При многократном динамическом воздействии точка, соответствующая напряженно-деформированному состоянию контакта в текущий момент времени, перемещается

вправо вдоль оси абсцисс (рис. 3). На основе данных рис. 3, можно сделать вывод, что в используемой модели контакта накопление значительных по величине деформаций на межблоковой границе (существенно превышающих величину предельного перемещения u_p) возможно даже при сдвигающем усилии меньшем, чем остаточная прочность контакта. Однако динамический срыв при этом произойти не может.

Численный эксперимент показал, что скорость накопления межблоковых перемещений существенно зависит от частоты сейсмического воздействия. Причем, анализируя полученные расчетные данные, можно заметить, что скорость накопления деформаций возрастает по мере приближения частоты сейсмических колебаний к частоте продольной резонансной моды $f_0 = a_0 / (2L)$. Для блока длиной 1000 м эта резонансная частота составляет 2 Hz. На рис. 4 приведены зависимости относительного перемещения от времени в середине основания верхнего блока при различной частоте сейсмического воздействия. Резонансному воздействию соответствует зависимость 2. Приведенные результаты убедительно подтверждают сделанное предположение о существенном увеличении скорости накопления межблоковых деформаций при резонансной частоте внешнего воздействия. Для дополнительной проверки данного вывода была выполнена серия расчетов с блоками длиной 2000 м. Результаты этой серии расчетов показали значительное увеличение скорости накопления межблоковых деформаций на частоте 4 Hz – резонансной частоте для заданного размера блока.

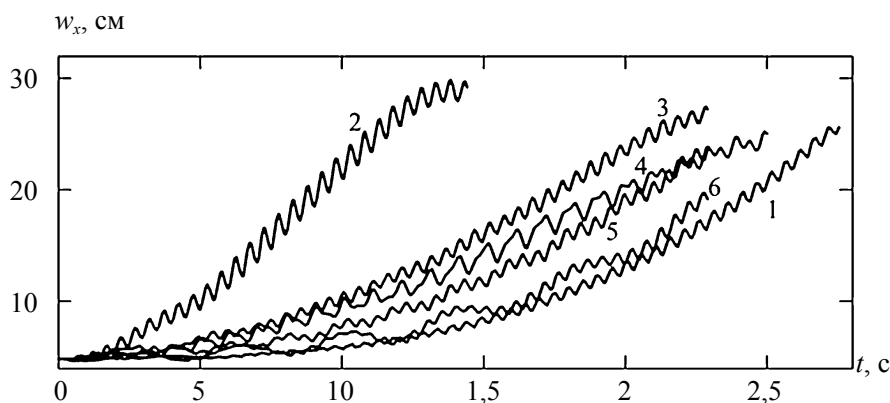


Рис. 4. Зависимость относительного перемещения от времени в середине основания верхнего блока при различной частоте сейсмического воздействия ($u_p = 20$ см).
1 – $f = 5$ Hz; 2 – $f = 2$ Hz; 3 – $f = 1,5$ Hz; 4 – $f = 1$ Hz; 5 – $f = 0,5$ Hz; 6 – $f = 0,25$ Hz.

Выявленный факт увеличения скорости накопления межблоковых деформаций на частотах воздействия, близких к резонансным, представляется нам достаточно важным, так как колебания резонансных частот могут генерироваться в самих элементах блочной системы при любых более низкочастотных внешних воздействиях [Марков и др., 2007].

В проведенных численных экспериментах влияние резонанса на процесс накопления деформаций столь значительно, что на этом фоне крайне затрудняется решение вопроса о частотной зависимости данного процесса от характеристик самого контакта, прежде всего таких, как величина предельной деформации u_p и размер «контактного пятна». Совокупность проведенных расчетов все же позволяет сделать некоторые заключения. Так, можно отметить, что при больших значениях u_p

скорость накопления деформаций в меньшей степени зависит от частоты сейсмического воздействия.

Перейдем к обсуждению результатов исследования влияния на параметры межблокового движения отдельных особенностей структуры и динамического поведения контактной границы: расположения контактных пятен и эффектов дилатансии на границе раздела. С целью изучения первого вопроса была проведена серия расчетов, в которой вместо одного контактного пятна шириной 20 м в середине основания блока задавались два пятна шириной 10 м, смещенные относительно середины основания блока на 100 м к торцам блока ($L = 1000$ м, $u_p = 20$ см). На рис. 5 приведены полученные в расчетном варианте с $f = 1$ Hz зависимости от времени относительного перемещения и нормальной к плоскости контакта компоненты тензора напряжений в середине основания верхнего блока при различной частоте сейсмического воздействия. Качественно эти данные очень похожи на полученные ранее, однако непосредственное сопоставление позволяет выявить некоторые количественные отличия. Эти отличия очень незначительны и, по-видимому, связаны с изменением баланса моментов сил трения и смещающей силы относительно центра инерции подвижного блока и, как следствие, с изменением распределения нормальных напряжений на контактной границе.

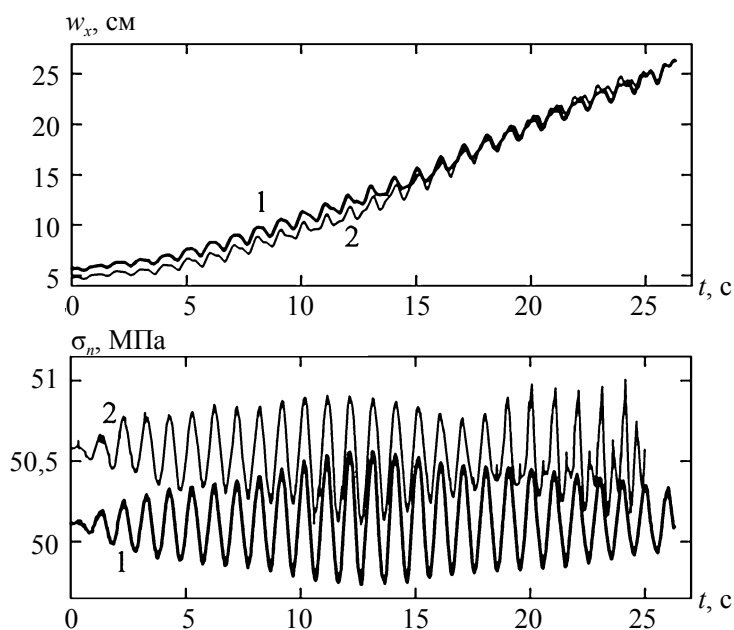


Рис. 5. Зависимости от времени относительного перемещения и нормальной к плоскости контакта компоненты тензора напряжений в середине основания верхнего блока ($f = 1$ Hz).

1 – расчет с двумя контактными пятнами, 2 – расчет с одним контактным пятном.

Представление о крупном структурном нарушении как о сплошной плоскости скольжения является достаточно упрощенным. Более корректной является, на наш взгляд, модель, в которой нарушение, разделяющее крупные структурные блоки, представлено как чередование плоскостей скольжения и небольших участков ненарушенной породы. В этом случае межблоковое движение включает в себя этап

сдвигового разрушения этих участков. В настоящей работе на основе численного эксперимента сделана оценка влияния эффектов дилатансии, которые могут сопровождать подобные процессы, на динамику межблоковых подвижек. Для этого была использована та же постановка задачи, что представлена на рис. 2, только граница между блоками представляла собой чередование участков скольжения с трением протяженностью 50 м, и «перемычек» (ненарушенной породы) протяженностью 2 м. Сдвиговое усилие на участках скольжения определялось на основе закона Кулона–Мора:

$$\tau = C + k\sigma_n \quad (4)$$

со сцеплением $C = 0$ и коэффициентом трения $k = 0,1$. Материал блоков описывался с помощью обобщенной квазиупругопластической (ОКУП) модели деформирования скальной породы [Замышляев и др., 1990]. В расчетах варьировался коэффициент скорости дилатансии Λ , который в ОКУП модели определяет связь между необратимыми объемными и сдвиговыми деформациями:

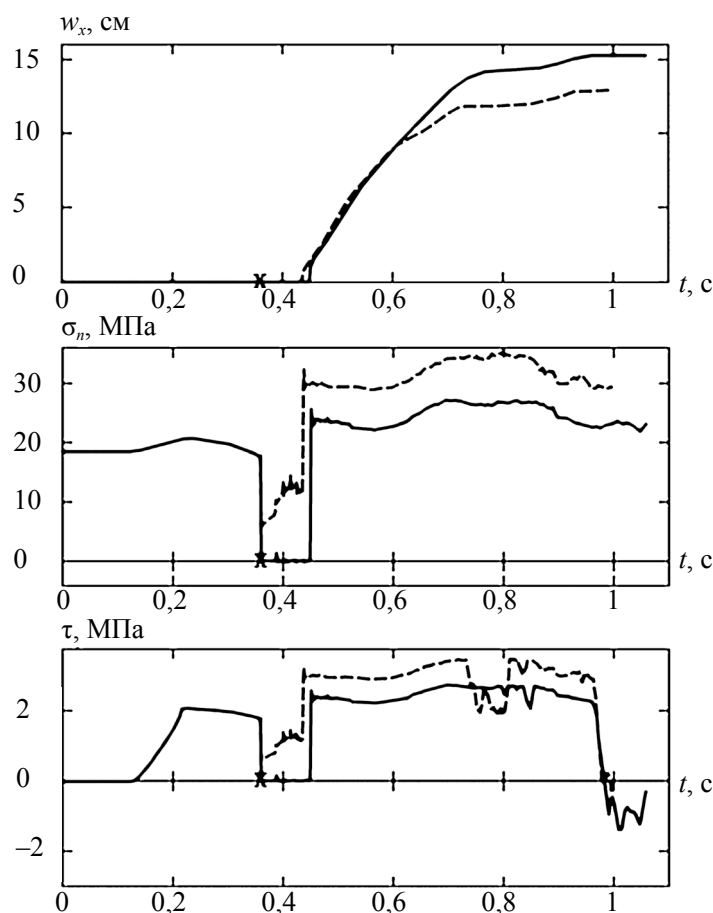


Рис. 6. Зависимости от времени относительного перемещения, нормальной и тангенциальной к плоскости контакта компонент тензора напряжений в середине основания верхнего блока. Сплошная линия – расчет с $\Lambda = 0$, пунктир – расчет с $\Lambda = 1$.

$$\frac{d\varepsilon^{(p)}}{dt} = -\frac{2}{\sqrt{3}}\Lambda \frac{d\gamma^{(p)}}{dt} + \left(\frac{1}{K_i} - \frac{1}{K_{St}} \right) \frac{dP}{dt}, \quad (5)$$

где $\varepsilon^{(p)}$ и $\gamma^{(p)}$ – необратимые деформации объема и сдвига, K_i и K_{St} – текущий и статический модули объемного сжатия. На рис. 6 сопоставлены зависимости от времени относительного перемещения, нормальной и тангенциальной к плоскости контакта компонент тензора напряжений в середине основания верхнего блока, полученные в расчетах с $\Lambda = 0$ и $\Lambda = 1$. Маркером на оси абсцисс отмечен момент начала разрушения находящейся в этом месте «перемычки». За моментом начала разрушения следует сначала резкий спад величин напряжений, связанный со значительным уменьшением прочности породы («разупрочнением») при разрушении. Затем напряжения вновь возрастают за счет дилатансии. Причем это возрастание тем существеннее, чем больше величина коэффициента скорости дилатансии Λ . Возрастание величины нормальной к плоскости контакта компоненты тензора напряжений вызывает, в свою очередь, возрастание величины сопротивления сдвигу τ и приводит к уменьшению скорости накопления межблоковых деформаций. Эффект этот локальный и проявляется только в непосредственной близости от «перемычек», однако, как показал расчет, способен оказать заметное влияние на движение всего блока в целом.

Заключение

Проведенные численные эксперименты показали, что специфическая реология нарушений сплошности приводит к возникновению остаточных перемещений берегов даже при весьма малых по сравнению с прочностью геоматериала амплитудах воздействия. Согласно результатам расчетов скорость накопления остаточных деформаций существенно возрастает по мере приближения частоты внешних низкоамплитудных воздействий к собственной (резонансной) частоте блочной структуры и слабо зависит от расположения контактных пятен на границе раздела. В случае, если нарушение сплошности может быть представлено как чередование плоскостей скольжения и залеченных участков («перемычек»), учет эффектов дилатансии при разрушении «перемычек» приводит к замедлению процесса накопления остаточных сдвиговых межблоковых деформаций при внешних низкоамплитудных воздействиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-05-01064-а) и ОНЗ РАН (программа № 6).

Литература

- Архипов В.Н., Борисов В.А., Будков А.М. и др. Механическое действие ядерного взрыва. М.: Физматлит, 2002. С. 50–58.
- Будков А.М. Разработка модели деформирования межблоковых промежутков с помощью метода численного математического моделирования. // Динамические процессы во взаимодействующих геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2006. С. 134–140.
- Будков А.М., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Численное моделирование процесса накопления межблоковых перемещений при низкоамплитудных динамических воздействиях // Физическая мезомеханика. 2010, т. 13, № 2. С. 21–30.

- Замышляев Б.В., Евтерев Л.С.* Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. М.: Наука, 1990. С. 32–58.
- Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В.* Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физическая мезомеханика. 2002, т. 5, № 5. С. 23–42.
- Кочарян Г.Г., Родионов В.Н.* О природе тектонических сил // Докл. АН СССР. 1988, т. 302, № 2. С. 304–305.
- Кочарян Г.Г., Федоров А.Е.* Об особенностях механики сейсмического процесса в блочной геофизической среде // Докл. АН СССР. 1990, т. 315, № 6. С. 1345–1349.
- Кочарян Г.Г., Спивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 423 с.
- Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В.* Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физическая мезомеханика. 2004, т. 7, № 1. С. 5–22.
- Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Марков Д.В., Павлов Д.В.* Малые возмущения и напряженно-деформированное состояние земной коры // Физическая мезомеханика. 2005, т. 8, № 1. С. 23–36.
- Кочарян Г.Г., Павлов Д.В.* Нарушение и залечивание зон локализации деформаций в массиве горных пород // Физическая мезомеханика. 2007, т. 10, № 1. С. 5–18.
- Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М.* О критической скорости деформации разломных зон // Доклады РАН. 2008, т. 418, № 3. С. 383–386.
- Майнцен Дж., Сак Е.* Метод расчета «ТЕНЗОР» // Сб. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 185–211.
- Марков В.К., Марков Д.В., Родионов В.Н.* Влияние частоты внешнего возмущения на спектры колебаний фрагментов структурированной блочной среды // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2007. С. 104–112.
- Соболев Г.А., Кольцов А.В., Андреев В.О.* Триггерный эффект колебаний в модели землетрясений // Докл. РАН. 1991, т. 319. С. 337–341.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Melosh H.J.* «Acoustic fluidization: A new geologic process?» // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 7513–7520.