

УДК 624.153.7

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ
В ПРОЦЕССЕ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ**

Ван Ксю-бин, Пан И-шан, Чжан Чжи-хуэй

*Ляонинский технический университет, E-mail: wxbbb@263.net,
Фуксин 123000, Китай*

Исследована пространственная локализация деформаций массива пород как перспективное направление решения проблемы зональной дезинтеграции (Шемякина – Опарина). Модели трехмерной нагрузки и разгрузки реализованы численно с применением деформационной теории. Нагружение после выемки тоннеля круглого сечения выполнено с контролем осевого смещения. В модели разгрузки после достижения статического равновесия постадийно проведена выемка цилиндрического тоннеля. Численные результаты показывают наличие явления зональной дезинтеграции, при которой кольцевые участки высоких деформаций сдвига изолированы или перемежаются с зонами малых деформаций сдвига. Проведено сравнение результатов расчетов модели нагружения с таковыми модели разгрузки; установлено их соответствие с результатами натурных наблюдений. В плоскости, ортогональной оси тоннеля, участки повышенной деформации сдвига образуются на существенном расстоянии от поверхности тоннеля в результате распространения зон сдвига, происхождение которых не связано с процессами деформирования в рассматриваемой плоскости.

Зональная дезинтеграция, модель нагружения, модель разгрузки, пространственная локализация деформации, зона сдвига, тоннель, гетерогенность

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что напряжения, превышающие предел упругости, вызывают приконтурное разрушение массива или формирование пластической зоны вблизи поверхности тоннеля. Вне пластической зоны породы остаются упругими. Ситуация меняется с ростом глубины. Во вмещающем тоннель породном массиве установлено наличие зональных периодических структур, т. е. чередование разрушенных (или трещиноватых) и упругих участков [1 – 5]. Наличие этого явления, известного как зональная дезинтеграция, подтверждено результатами полевых геофизических или перископных исследований. Данное явление противоречит традиционным представлениям о разрушении массива пород вокруг тоннеля. Полученные результаты свидетельствуют о том, что на большой глубине количество зон разрушений может быть от 3 до 5. Таким образом, возникают проблемы применения традиционных методов крепления для зон разрушения, так как они могут оказаться неэффективными в глубоких подземных выработках.

Работа выполнена при поддержке Китайского национального фонда естественных наук, проект № 50974069, Национальной программы научно-исследовательской деятельности Китая, проект № 2010CB226803 и Программы поддержки талантов Ляонинского университета, проект № LJQ201103).

Для разработки новых теорий и методов крепления на большой глубине необходимо иметь четкое представление о механизме зональной дезинтеграции. Тоннель может быть пройден по контуру разрушенной зоны, что повысит эффективность его сооружения и снизит затраты, а крепежные стержни могут быть установлены на упругих участках, что повысит надежность вмещающего тоннель массива [5]. Однако для этого необходимо иметь прогноз развития зональной дезинтеграции во вмещающем массиве, испытывающем воздействие определенных напряжений. Потенциальная важность теории и практики явления дезинтеграции массива объясняет возросший интерес русских [1–12] и китайских [13–24] ученых к исследованиям в этой области. Академик Цань является основателем подобных исследований в Китае [14]. В ходе исследований, посвященных механизму зональной дезинтеграции, разработаны новые теории и методы, дополняющие традиционные упругопластические модели, например неевклидова континуальная теория [7, 18], континуальная теория пластического градиента [16], термодинамика [10, 12, 15], механика трещинообразования [13], континуальная теория фазового перехода [15], теория линий скольжений [9] и др. В ряде публикаций результаты получены с помощью методов конечных элементов и конечных разностей [21, 23, 24]. Достиженные результаты способствуют более полному пониманию деформации разрушения, стабильности вмещающего тоннель породного массива. К сожалению, все исследователи рассматривали двумерный случай. В настоящее время остается неясным вопрос, почему несколько кольцевых зон разрушения могут сформироваться вне упругой зоны?

В данной работе приводятся численные результаты для моделей нагружения и разгрузки, полученные с использованием программы FLAC-3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) моделирования разрушения и пластического течения трехмерной континуальной среды. Программа объединяет три основных метода: метод конечных разностей, комбинированный метод дискретизации и метод динамического решения. Как расширение программы FLAC-3D в данной работе применялась базовая модель, рассматривающая гетерогенность элементов среды согласно закону распределения Вейбулла [24–28]. На основе полученных результатов установлена картина развития зональной дезинтеграции в пространственном случае.

ГЕТЕРОГЕННАЯ КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ И ЕЕ ПАРАМЕТРЫ

Для элементов упругой стадии деформирования приемлема изотропная линейно-упругая модель:

$$\Delta\sigma_{ij} = 2G\Delta\varepsilon_{ij} + \left(K - \frac{2}{3}G\right)\Delta\varepsilon_{kk}\delta_{ij}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma_{ij}$ — компоненты тензора приращений напряжений; $\Delta\varepsilon_{ij}$ — компоненты тензора приращений деформаций; G — модуль сдвига; K — модуль объемной деформации; δ_{ij} — символ Кронекера.

Критерием разрушения выбран критерий Кулона–Мора:

$$\sigma_1 = \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi}, \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_t, \quad (3)$$

где $N_\phi = (1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$; ϕ — угол внутреннего трения; c — сцепление; σ_t — предел прочности на разрыв.

В программе FLAC-3D параметры ϕ , c , σ_t можно рассматривать как функции пластического сдвига или деформации растяжения. Их начальные значения соответствуют нулевой пластической деформации. Постпиковое деформационное разупрочнение продолжается до остаточной стадии, на которой эти параметры имеют уже “остаточные” значения.

Закон распределения Вейбулла [26, 27] применяется для описания неравномерного распределения рассматриваемых параметров:

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m\right], \quad (4)$$

где m — коэффициент формы для выражения разброса какого-либо параметра u , например модуля упругости, предела прочности, сцепления; u_0 — его среднее значение.

В данной работе три параметра — модуль упругости (рис. 1а), начальное сцепление (рис. 1б) и начальная прочность на растяжение (рис. 1в) — подчиняются закону распределения Вейбулла, при этом используется $m = 6$. Средние значения модуля упругости $\bar{E} = 15$ ГПа, начального сцепления $\bar{c} = 27$ МПа и начальной прочности на растяжение $\bar{\sigma}_t = 5$ МПа. Угол внутреннего трения остается постоянным и равным 27.8° (рис. 1з).

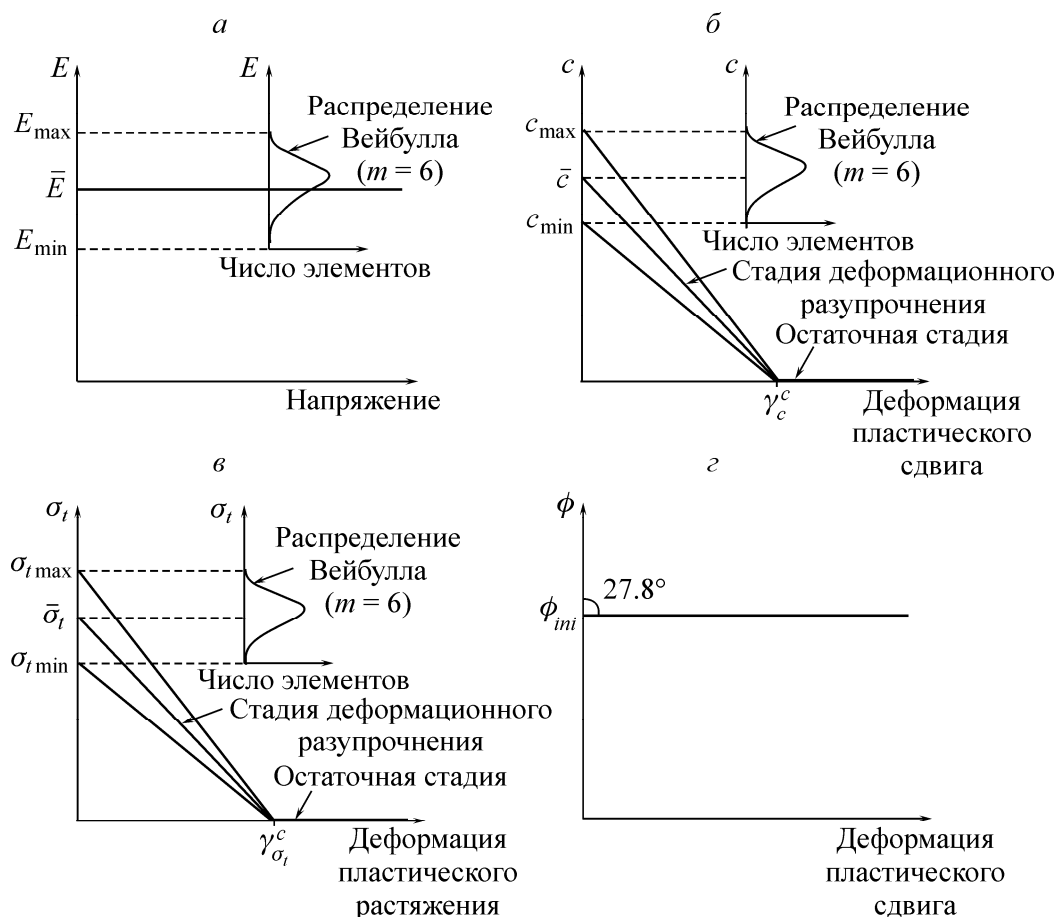


Рис. 1. Эволюция параметров элементов: а — неравномерный модуль упругости, не зависящий от увеличения напряжения или деформации; б — неравномерное сцепление при деформационном разупрочнении; в — неравномерная прочность на растяжение при деформационном разупрочнении; з — постоянный угол внутреннего трения, $\phi = \phi_{ini} = 27.8^\circ$

Отметим, что три рассматриваемых неравномерных параметра являются некоррелированными, что повышает пространственную сложность их распределения. На рис. 2 показано распределение этих параметров на поверхностях трехмерной модели, построенной до выемки тоннеля. Голубой цвет обозначает минимальное значение, красный — максимальное. Максимальные значения модуля упругости $E_{\max} = 22$ ГПа, начального сцепления $c_{\max} = 40$ МПа и начального предела прочности на разрыв $\sigma_{t\max} = 7$ МПа, минимальные значения $E_{\min} = 4$ ГПа, $c_{\min} = 5$ МПа и $\sigma_{t\min} = 1$ МПа.

Сделано предположение, что $\gamma_c^c = \gamma_{\sigma_t}^c = 5 \times 10^{-4}$. Такие экстремально низкие значения, отражают хрупкий характер породных элементов, т. е. сцепление и прочность на разрыв мгновенно падают до нулевого остаточного значения.

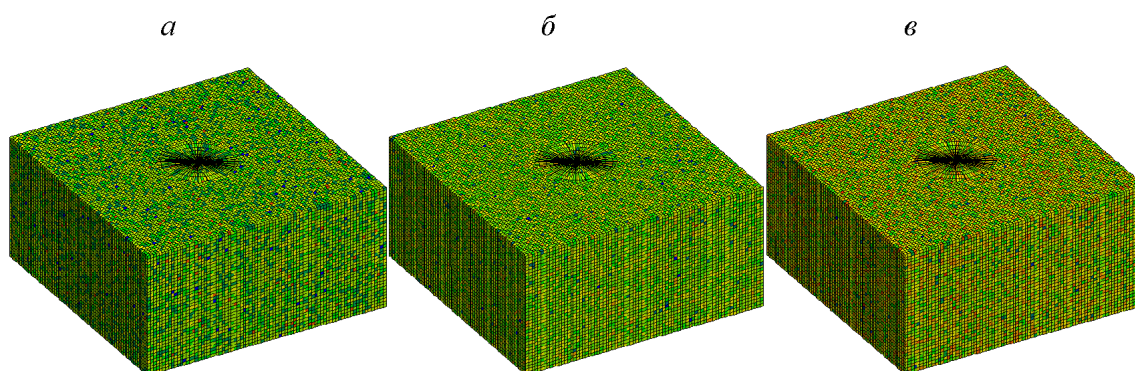


Рис. 2. Распределение параметров вмещающего массива на поверхностях трехмерной модели до выемки тоннеля: *a* — модуль упругости; *б* — начальное сцепление; *в* — начальная прочность на разрыв

МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕЛА ПРИ НАГРУЖЕНИИ

Модель среды имела вид параллелепипеда размером $0.3 \times 0.3 \times 0.15$ м с цилиндрическим отверстием радиусом 0.04125 м. До выемки тоннеля число расчетных элементов составляло 261 120, число узлов — 272 281. После частичной или полной выемки тоннеля часть элементов и узлов исчезает из модели. Ось тоннеля параллельна четырем малым граням и проходит через центры двух больших, одна из которых выбрана в качестве конечного пункта нагружения. На этом конце смещение s в направлении оси тоннеля определяется скоростью нагружения v : $s = vt$, где t — временной (расчетный) шаг, а $v = 1 \times 10^{-7}$ м/временной шаг, т. е. является малой величиной в условиях квазистатического нагружения. Нормальные смещения на других пяти гранях равны нулю.

Временной шаг в FLAC-3D — это цикл разового выполнения основных уравнений в узлах сетки. Предполагается проведение десятков тысяч временных шагов для достижения устойчивого состояния. Важно отметить, что выемка тоннеля в расчетной модели осуществляется до стадии нагружения. Нагружение с контролируемым смещением прикладывается к модели с выемкой.

На рис. 3, 4 представлены картины распределения деформации сдвига при 10 000 и 18 000 временных шагах соответственно. Расчетные напряжения, действующие на верхнюю грань модели, 130 и 160 МПа соответственно. На рис. 3а, 4а показана половина модели для демонстрации

распределения деформации сдвига на плоскости, проходящей через ось тоннеля. На рис. 3, 4 чем темнее цвет, тем выше деформация сдвига. Следует отметить, что вблизи поверхности тоннеля деформации сдвига самые высокие.

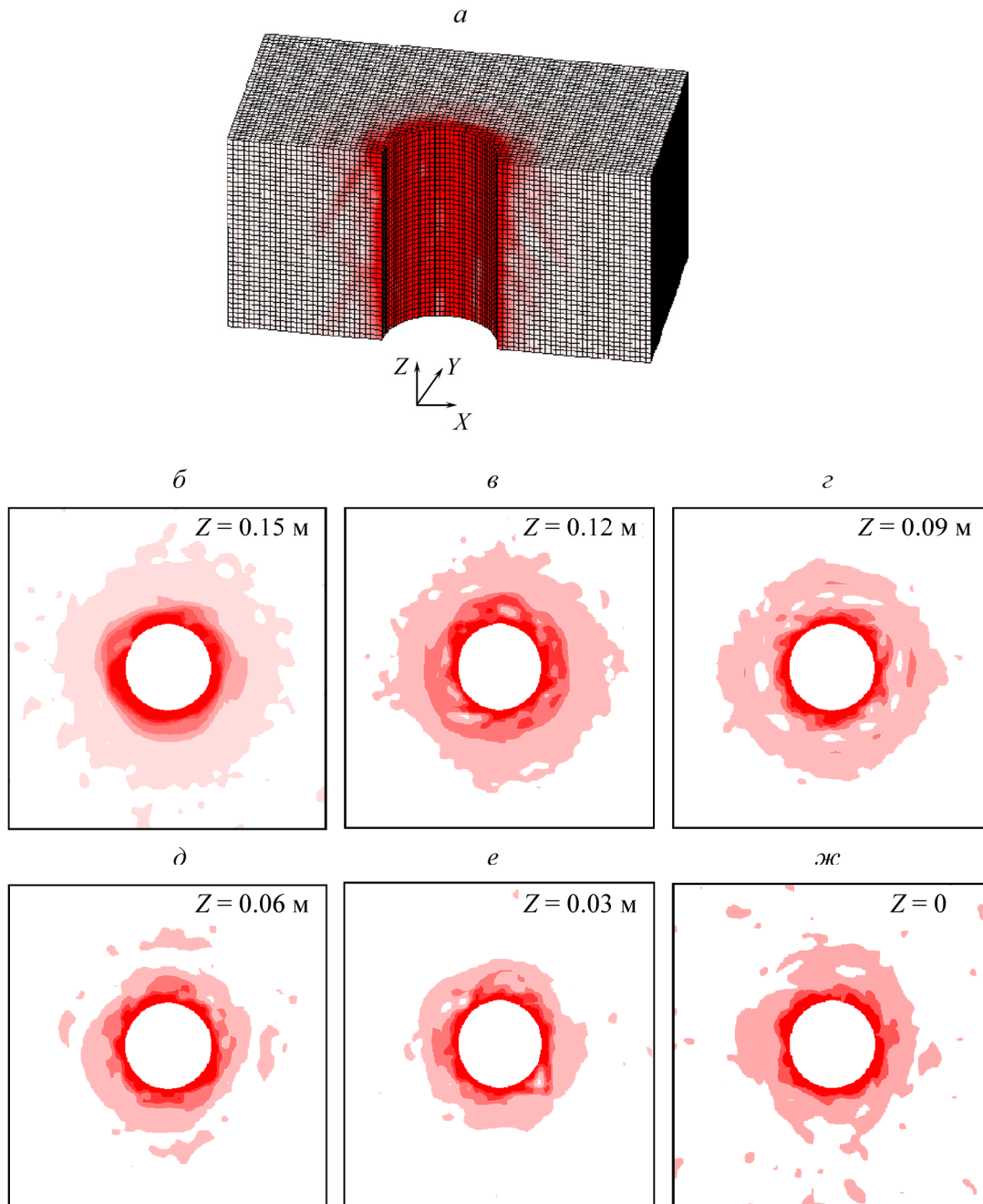


Рис. 3. Распределение деформаций сдвига на внутренней части половины модели нагружения (а), а также в сечениях, ортогональных оси Z (б–ж) при 10 000 временных шагах, соответствующих напряжению сжатия 130 МПа на верхней грани модели

На рис. 3б–ж, 4 б–ж показаны распределения деформаций сдвига в плоскостях, ортогональных оси тоннеля. Первая и последняя плоскости при этом соответствуют верхней и нижней граням модели.

Рассмотрим эти рисунки. На рис. 3а видны сформировавшиеся зоны локализованной деформации или так называемые зоны сдвига. Они берут начало с поверхности тоннеля и распространяются наклонно в глубь вмещающего породного массива. Эти параллельные зоны сдвига ориентированы примерно под углом 45° относительно оси тоннеля.

На рис. 3б повышенные деформации сдвига сконцентрированы вблизи поверхности тоннеля. Они уменьшаются с увеличением расстояния от поверхности тоннеля. На рис. 3в распределение деформации сдвига неравномерно в окружном направлении. Данные рис. 3г говорят о том, что примерно девять более светлых участков малой деформации сдвига окружены темными зонами повышенной деформации. Следовательно, распределение деформации сдвига в определенных радиальных направлениях немонотонно, поскольку два участка повышенной деформации сдвига вклиниваются в участок малой деформации.

Детальное изучение рис. 3г позволяет заключить, что приблизительно шесть узких более темных зон находятся в стороне от небольших светлых зон на достаточно большом расстоянии от поверхности тоннеля. Так, две более темные зоны повышенной деформации сдвига можно увидеть на рис. 3г. Первая ближе к поверхности тоннеля, а вторая не сформирована полностью.

На рис. 3д четыре петлеобразные изолированные зоны повышенных деформаций сдвига сформированы на значительном расстоянии от кольцевой зоны вблизи поверхности тоннеля. Эти зоны не контактируют между собой.

Распределение деформаций на рис. 3е–ж не отличается от рис. 3б.

Следует отметить, что на рис. 3 нет четко выраженной локализации сдвига. Длины зон сдвига приблизительно равны диаметру тоннеля.

На рис. 4 показаны результаты вычислений при более высоких напряжениях, действующих на верхней грани модели.

На рис. 4а четко видны три кольцевые зоны повышенной деформации сдвига. На плоскости симметрии, проходящей через ось тоннеля, участок сдвига, сформированный на рис. 3а, удлиняется и получает развитие. Помимо этого сопряженные участки сдвига расположены так, что образуют сеть.

На рис. 4б имеются две–три зоны повышенного сдвига: первая — вблизи поверхности тоннеля, вторая берет начало из первой, третья начинается из второй. Третья зона имеет форму, близкую к кольцевой. Самые высокие напряжения сдвига действуют в первой зоне, а самые низкие — в третьей зоне.

Результаты рис. 4в–г подобны результатам рис. 4б, несколько изогнутых зон сдвига образованы вблизи поверхности тоннеля и ограничены по простиранию.

На рис. 4а–г изогнутые зоны сдвига формируются между первым и вторым участком повышенных деформаций сдвига. Вторая и третья зоны не пересекаются. Третья зона повышенных деформаций сдвига не образует замкнутого кольца.

Участки повышенной деформации сдвига почти кольцеобразной формы представлены на рис. 4е–ж. Как установлено из рис. 4а, зарождаются они на поверхности тоннеля в плоскости $Z = 0.09$ м, а не с соответствующих поверхностей тоннеля: пятой ($Z = 0.03$ м) и шестой ($Z = 0$).

Результаты, показанные на рис. 4, подобны данным натурального изучения дезинтеграции [1, 4], в то время как на рис. 3 дезинтеграция выражена нечетко из-за недостаточно высоких напряжений.

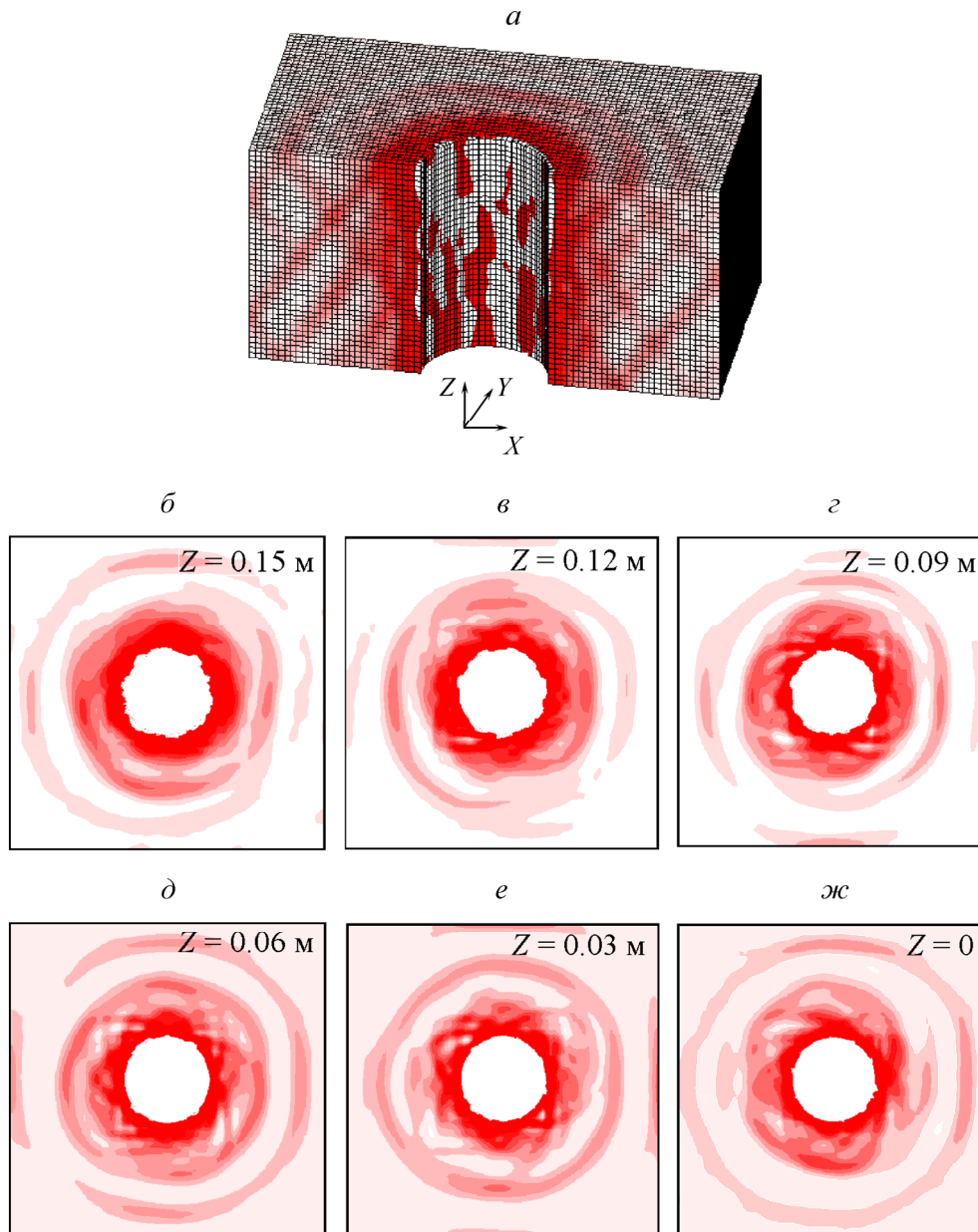


Рис. 4. Распределение деформаций сдвига на внутренней части половины модели нагружения (а) и на шести плоскостях, ортогональных оси Z (б–ж), при 18 000 временных шагах, соответствующих напряжению сжатия 160 МПа на верхней грани модели

МОДЕЛЬ РАЗГРУЗКИ

В модели разгрузки рассмотрена трехэтапная выемка тоннеля. Сначала модель в форме параллелепипеда сжималась вертикальной нагрузкой 90 МПа и боковыми нагрузками 30 МПа. Вводилось ограничение по смещениям для нижнего основания модели. На этой стадии расчетов использовано 10 657 временных шагов, для того чтобы получить практически стационарное состояние. Затем проводились первая, вторая и третья выемки, в каждой из которых длина тоннеля возрастала на четверть высоты модели. После каждой выемки расчет зон сдвига состоял из 1200, 1920 и 4 000 временных шагов соответственно.

На рис. 5а–в показано распределение деформаций сдвига при применении модели разгрузки на трех различных стадиях выемки. Самые высокие значения деформаций сдвига равны 0.03, 0.08 и 0.39 соответственно. На рис. 5г–е представлено распределение деформаций сдвига в основании модели. Самые темные цвета соответствуют малым деформациям сдвига. Белый цвет (рис. 5б–в) обозначает высокую деформацию сдвига.

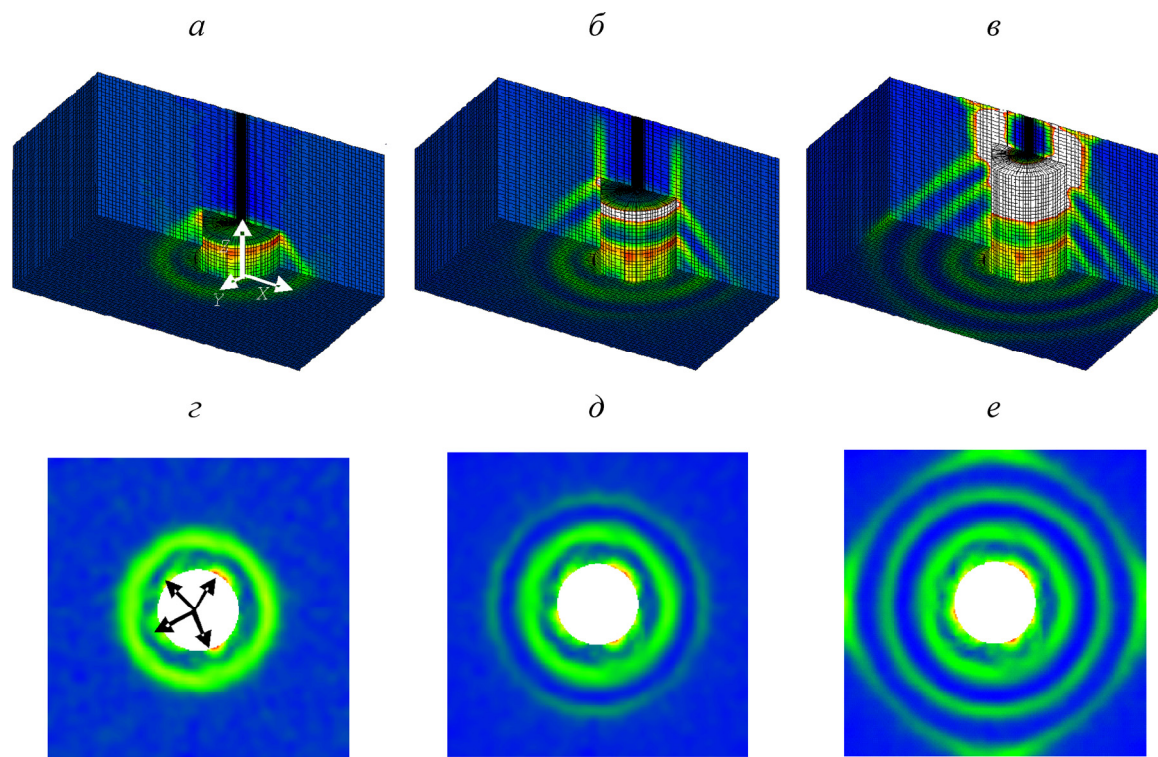


Рис. 5. Распределение деформаций сдвига для модели разгрузки на трех стадиях выемки: а, г — сделано 1200 временных шагов после первой выемки; б, д — сделано 1920 временных шагов после второй выемки; в, е — сделано 4000 временных шагов после третьей выемки

Отметим, что после первой выемки в основании модели сформировались две кольцевые зоны повышенной деформации сдвига (рис. 5а, г). Первая, ближе к поверхности тоннеля, вызвана разрушением элементов на поверхности тоннеля, вторая, далеко от поверхности, образовалась в результате развития наклонной зоны сдвига. Эти зоны сдвига зарождаются на внутренней поверхности тоннеля. Перед грудью тоннеля не отмечено особой концентрации деформаций, что видно из рис. 5а и особенно из рис. 5б–в.

На рис. 5г после первой выемки расстояние между первой и второй зонами высокой деформации сдвига сравнительно небольшое, в то время как расстояние между второй и третьей зонами после второй выемки (рис. 5д) и между третьей и четвертой зонами после третьей выемки значительно больше (рис. 5е). Две смежные зоны высокой концентрации деформаций сдвига не пересекаются, что несколько противоречит результатам, приведенным на рис. 4. Кольцевая зона малой деформации сдвига разделяет две кольцевые зоны высокой деформации сдвига. Эти численные результаты хорошо согласуются с натурными данными исследования зональной интеграции [1, 4] и лабораторными результатами [22]. Итак, результаты модели разгрузки находятся в хорошем соответствии с натурными данными в отличие от результатов модели нагрузки.

Обратимся к анализу экспериментальных данных. Трехмерные физические испытания проводились на толстостенных полых цилиндрах из сухого тонкого песка, помещенных в стальную бочку [22], с приложением достаточно большой нагрузки в осевом направлении. Детальное изучение образцов после испытаний показало, что трещины сдвига формируются в плоскостях, проходящих через ось отверстия. В плоскостях, перпендикулярных этой оси, сформировано несколько петлеобразных трещин разного радиуса, характера и в разных плоскостях. Полученные в работе численные результаты находятся в соответствии с выводами в [22].

Необходимо отметить, что имеются приблизительно четыре треугольные зоны экстремально высокой деформации сдвига вблизи поверхности тоннеля (рис. 5*г–е*), показанные на рис. 5*г* стрелками. В случае отслоения материала от вмещающих пород в этих зонах может образоваться V-образный провал, подобный естественным провалам в результате горного удара.

МЕХАНИЗМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ

Используя расчетные данные для обеих моделей, можно объяснить природную зональную дезинтеграцию с точки зрения пространственной локализации деформации. Предполагается, что массив в плоскостях, проходящих через ось тоннеля, находится в состоянии плоской деформации. В этих плоскостях полученные численные результаты указывают на возможность формирования параллельных или сопряженных зон сдвига. На практике при выполнении условий плоской деформации вполне типично формирование единичных или многочисленных зон сдвига, особенно при наличии высоких поперечных напряжений в таких геоматериалах, как горная порода и грунт. На рис. 6 показаны численные результаты расчета процесса сжатия при плоской деформации в деформационно-разупрочняемых гомогенных и гетерогенных материалах [29–31]. Если такой характер зон сдвига реализуется в разных плоскостях, проходящих через ось тоннеля, то следует ожидать формирования нескольких конусообразных зон пространственной локализации деформации.

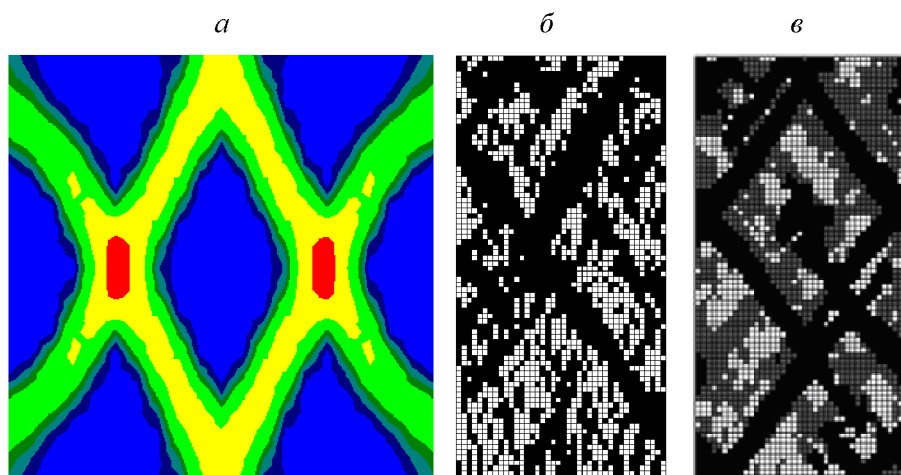


Рис. 6. Многочисленные зоны сдвига в условиях плоской деформации [29–31]

Схема предложенного механизма пространственной локализации деформации в процессе зональной дезинтеграции представлена на рис. 7. Предположим, что выемку тоннеля проводят стадийно в направлении от основания к верхушке модели. При наличии зон сдвига и рассмотрении их под углом обзора β непосредственно из тоннеля, можно ожидать, что это несколько

кольцевых зон повышенного сдвига. Русские исследователи называют данное явление зональной дезинтеграцией. Однако при наличии таких зон и рассмотрении их под углом обзора α ортогонально плоскости, проходящей через ось тоннеля, можно наблюдать хорошо известное явление в механике горных пород — развитие параллельных многочисленных или сопряженных зон сдвига.

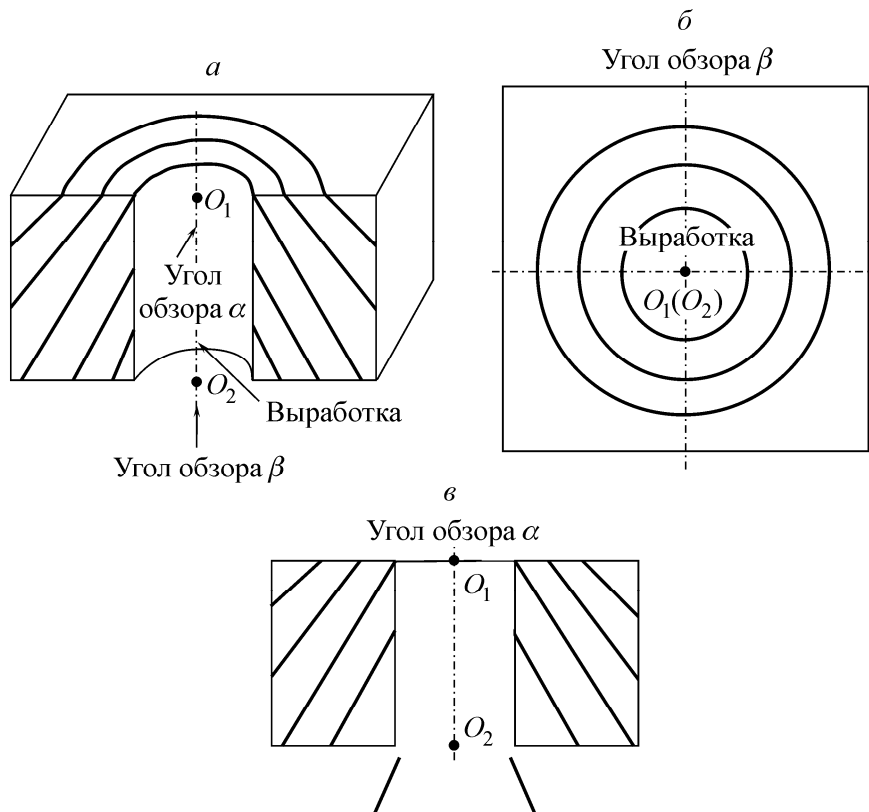


Рис. 7. Распределение зон сдвига в трехмерной модели с двух разных направлений

ВЫВОДЫ

1. Исследование явления зональной дезинтеграции заключается в изучении причин формирования областей разрушения вне контуров первой зоны разрушения вблизи поверхности тоннеля. В представленных исследованиях это явление рассмотрено в рамках модели пространственной локализации деформации.

2. Численные результаты, полученные с применением трехмерной гетерогенной базовой модели деформационного разупрочнения, показали, что кольцевые зоны высоких деформаций сдвига изолированы и разделены зонами малых деформаций. Данные расчетов с использованием модели разгрузки находятся в лучшем соответствии с полевыми наблюдениями по сравнению с результатами применения модели нагрузки. В плоскости, ортогональной оси тоннеля, участки с повышенной деформацией сдвига формируются в результате развития зон сдвига, возникающих на других плоскостях.

3. Особая значимость явления зональной дезинтеграции для ведения горных работ на больших глубинах определяет целесообразность более детальных исследований проблем, связанных с этим явлением, например исследований влияния на дезинтеграцию таких механических параметров, как модуль упругости, постпиковая хрупкость, горное давление, граничные условия, геометрия тоннеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shemyakin E. I., Fisenko G. L., Kurlenya M. V., Oparin V. N., et al.** Zonal disintegration of rocks around underground workings. Part I: Data of in-situ observations, Soviet Mining Science, 1986, Vol. 22, No. 3.
2. **Shemyakin E. I., Fisenko G. L., Kurlenya M. V., Oparin V. N., et al.** Zonal disintegration of rocks around underground workings. Part II: Fracturing of rocks on models of equivalent materials, Soviet Mining Science, 1986, Vol. 22, No. 4.
3. **Shemyakin E. I., Fisenko G. L., Kurlenya M. V., Oparin V. N., et al.** Zonal disintegration of rocks around underground mines. Part III: Theoretical concepts, Soviet Mining Science, 1987, Vol. 23, No. 1.
4. **Shemyakin E. I., Oparin V. N., Kurlenya M. V., Reva V. N., et al.** Zonal disintegration of rocks around underground workings. Part IV: Practical applications, Soviet Mining Science, 1989, Vol. 25, No. 4.
5. **Oparin V. N.** Nonlinear mechanics properties in deep mining, Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2009, Vol. 28, No. 5.
6. **Odintsev V. N.** Mechanism of the zonal disintegration of a rock mass in the vicinity of deep-level working, Journal of Mining Science, 1994, Vol. 30, No. 4.
7. **Gusev M. A., Paroshin A. A.** Non-euclidian model of the zonal disintegration of rocks around an underground working, Applied Mechanics and Technical Physics, 2001, Vol. 42, No. 1.
8. **Oparin V. N., Kurlenya M. V.** Gutenberg velocity section of the earth and its possible geomechanical explanation. Part I: Zonal disintegration and the hierarchical series of geoblocks, Journal of Mining Science, 1994, Vol. 30, No. 2.
9. **Chanyshv A. I.** To the problem of deformable medium failure. Part I: Basic equations, Journal of Mining Science, 2001, Vol. 37, No. 3.
10. **Metlov L. S., Morozov A. F., Zborshchik M. P.** Physical foundations of mechanism of zonal rock failure in the vicinity of mine working, Journal of Mining Science, 2002, Vol. 38, No. 2.
11. **Reva V. N.** Stability criteria of underground workings under zonal disintegration of rocks, Journal of Mining Science, 2002, Vol. 38, No. 1.
12. **Protosenya G., Arkhipov M. N., Trushko V. L.** Dynamic-stress concentration around workings of different configuration under nonstationary seismic waves, Soviet Mining Science, 1990, Vol. 26, No. 4.
13. **Zhou X. P., Wang F. H., Qian Q. H., et al.** Zonal fracturing mechanism in deep crack-weakened rock masses, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2008, Vol. 50, No. 1.
14. **Qian Q. H.** The Characteristic scientific phenomena of engineering response to deep rock mass and the implication of deepness, Journal of East China Institute of Technology, 2004, Vol. 27, No. 1.
15. **Qi C. Z., Qian Q. H., Wang M. Y.** Evolution of the deformation and fracturing in rock masses near deep level tunnels, Journal of Mining Science, 2009, Vol. 45, No. 2.
16. **Wang M. Y., Qi C. Z., Qian Q. H., et al.** One plastic gradient model of zonal disintegration of rock mass near deep level tunnels, Journal of Mining Science, in press
17. **Gu J. C., Gu L. Y., Chen A. M., et al.** Model test study on mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, Vol. 27, No. 3.
18. **Qian Q. H., Zhou X. P.** Non-euclidean continuum model of the zonal disintegration of surrounding rocks around a deep circular tunnel in a non-hydrostatic pressure state, Journal of Mining Science, 2011, Vol. 47, No. 1.
19. **He Y. N., Jiang P. S., Han L. J., et al.** Study of intermittent zonal fracturing of surrounding rock in deep roadways, Journal of China University of Mining & Technology, 2008, Vol. 37, No. 3.

20. **Li S. C., Wang H. P., Qian Q. H., et al.** In-situ monitoring research on zonal disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, Vol. 27, No. 8.
21. **Tang C. A., Zhang, Y. B.** Discussion on mechanism and evolution laws of fracture spacing in rock mass, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, Vol. 27, No. 7.
22. **Zhang Z. H., Wang X. B., Pan Y. S.** Experiment on utilizing multi-kinds of similar materials to simulate zonal disintegration phenomenon, Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011, Vol. 22, No. 3.
23. **Li S. C., Feng X. D., Li S. C., et al.** Numerical simulation of zonal disintegration for deep rock mass, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, Vol. 30, No. 7.
24. **Wang X. B., Pan, Y. S.** Theory of stability of rock structures and numerical simulation of failure process, Cultivation in Mechanics and Engineering Sciences (in Chinese). Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 2009.
25. **Wang X. B., Pan Y. S.** Preliminary failure process modeling of strain-softening rocks with heterogeneity and stiffness deterioration, The 3rd International Symposium on Modern Mining & Safety Technology Proceedings, Beijing: Coal Industry Publishing House, 2008.
26. **Wang X. B., Ma J., Liu L. Q.** Numerical simulation of failed zone propagation process and anomalies related to the released energy during a compressive jog intersection, Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2010, Vol. 5, No. 6.
27. **Wang X. B., Ma J., Liu L. Q.** A Comparison of mechanical behavior and frequency-energy relations for two kinds of echelon fault structures through numerical simulation, Pure and Applied Geophysics, to be published.
28. **Wang X. B., Zhang J.** Numerical simulation of failure process of three-point bending concrete beam considering heterogeneity of tensile strength and post-peak softening curve, Engineering Mechanics, 2009, Vol. 26, No. 12.
29. **Wang X. B., Pan Y. S., Sheng Q., et al.** Numerical simulation on strain localization of end constraint of rock specimen, Journal of Engineering Geology, 2002, Vol. 10, No. 3.
30. **Wang X. B.** Numerical simulation of failure processes and acoustic emissions of rock specimens with different strengths, Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, Vol. 30, No. 8.
31. **Wang X. B.** Numerical simulation of failure precursor and shear bands for rock specimens with random material imperfections, Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, Vol. 3, No. 6.

Поступила в редакцию 28/III 2013