УДК 624.195

М.А.КАРАСЕВ, *канд. техн. наук, доцент, karasevma@gmail.com*
Н.А.БЕЛЯКОВ, *аспирант, nike-bel@yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

M.A.KARASEV, *PhD in eng. sc., associate professor, karasevma@gmail.com*
N.A.BELYKOV, *post-graduate student, nike-bel@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТА ПОДАТЛИВОСТИ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ НА ОСНОВАНИИ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Работа посвящена вопросам реализации численного эксперимента на примере элемента податливости обделки тоннеля. Разработана численная модель элемента податливости обделки тоннеля. Получены характеристики поведения податливого элемента с различными геометрическими параметрами. Представлен характер деформирования податливого элемента обделки.

Ключевые слова: податливый элемент, тоннель, смещения, обделка, численное моделирование.

NUMERICAL MODELING OF TUNNEL YIELD ELEMENT BEHAVIOUR

Numerical model of lining yield element is created. Induced deformation Force – Displacement behavior of lining yiled elements with different geometrical sections is founded. Deformation state of lining element under induced displacement is presented.

Key words: yield element, tunnel, displacement, lining, numerical modeling.

Строительство тоннелей в тектонически нарушенных породах, склонных к значительным деформациям, связано со значительными сложностями. При проведении тоннелей на тектонически нарушенных участках породного массива могут возникать ситуации, когда трасса тоннеля пересекает пласт относительно слабых пород (в основном это глинистые породы разной степени литификации или породы, содержащие глинистые частицы), расположенный между двумя блоками прочных пород, характеризуемых высокими значениями модуля общей деформации. В этом случае после обнажения контура тоннеля на рассматриваемом участке могут быть реализованы значительные деформации пород вмещающего массива в окрестности тоннельной выработки и, как следствие, произойдут смещения контура тоннеля. Общая конвергенция стенок тоннеля может достигать 1 м и более. Такая картина деформирования горных пород вмещающего массива развивается по нескольким причинам.

Слабый пласт породы обжимается с двух сторон прочными коренными породами, что вызывает его деформацию. Деформации в слабом пласте породы стремятся реализоваться в сторону наименьшего отпора, т.е. в направлении выработанного пространства. Другими словами, происходит выдавливание слабой породы в сторону образовавшейся в массиве полости. По большей части пласт слабой породы сложен осадочными породами, реологические процессы в которых достаточно ярко проявляются

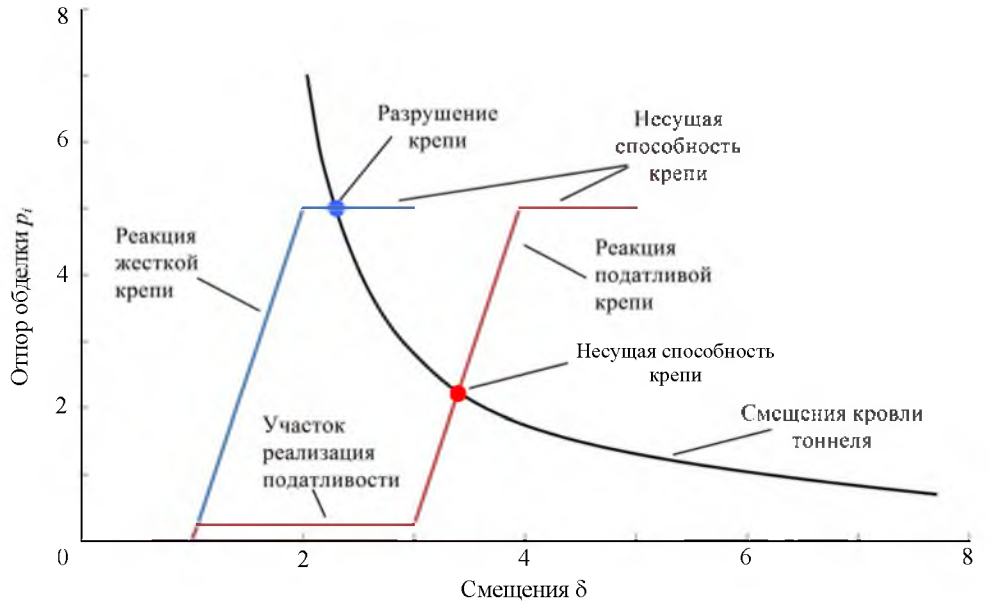


Рис.1. Работа обделки при совместной деформировании с окружающим тоннель массивом

при действии высоких напряжений, что является причиной длительного развития деформаций во времени в окрестности выработанного пространства и, как следствие, конвергенции контура тоннеля.

Установка жесткой обделки у забоя тоннеля в таких условиях не рекомендуется (рис.1). Чем выше жесткость обделки, тем выше значения радиальных напряжений, формирующихся на ее контакте с породой. Установка обделки на некотором расстоянии от забоя тоннеля не позволяет значительно улучшить условия ее работы. Деформации ползучести породного массива в окрестности выработки, которые, как показывает практика, являются основным механизмом деформирования горных пород в таких условиях, могут реализовываться на протяжении периода от нескольких месяцев до года и более. Таким образом, для обеспечения надежного закрепления данного участка тоннеля и возможности обделки уходить от нагрузки, возникающей вследствие значительных смещений контура тоннеля, необходимо применять податливые конструкции обделок с заданной величиной максимального отпора.

Существующие методы строительства тоннелей в породах, склонных к значительным деформациям, базируются на двух подходах. Первый подход заключается в заполнении пространства между обделкой и породным контуром сильно уплотняемым материалом. В качестве примеров могут служить забутовка закрепного пространства деревянными брусьями (рис.2, *а*), выполняющими роль сжимаемого материала, или установка блоков из древесины, выполняющих роль податливых элементов в монолитной бетонной обделке (рис.2, *б*).

Второй подход основан на использовании крепей, конструкция которых позволяет воспринимать большие деформации без разрушения и потери устойчивости.

При строительстве транспортных тоннелей значительное распространение в качестве временной крепи, а в некоторых случаях и постоянной обделки, получило набрызгбетонное покрытие. Крепь, выполненная из набрызгбетона, хотя и обладает значительной несущей способностью, не может воспринимать большие деформации. Это объясняется хрупким характером работы бетона. Усиление набрызгбетонной крепи арматурой повышает ее деформационную способность незначительно. Таким образом, применение набрызгбетонной крепи без специальных мер по обеспечению ее податливости нецелесообразно.

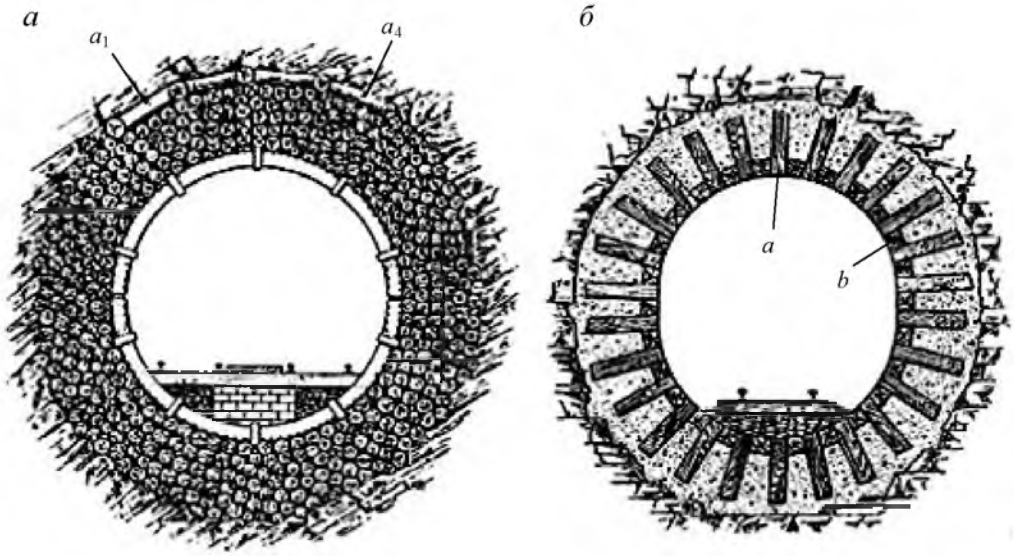


Рис.2. Примеры выполнения податливости крепи [1]: *а* – деревянная забутовка; *б* – деревянные податливые элементы

Наиболее проработанным способом обеспечения податливости набрызбетонной крепи является введение в ее конструкцию податливых элементов из сильно сжимающегося бетона или металлических элементов [1-4].

Для обоснования параметров работы податливых элементов в конкретных условиях строительства тоннеля или при выполнении доработки его конструктивного решения, необходимо получить характеристику работы этого элемента, которую обычно выражают зависимостью в осях смещение – осевая нагрузка. Эта зависимость позволяет оценить эффективность применения элемента податливости в конкретных условиях.

Получить характеристику работы податливого элемента можно, проведя ряд лабораторных экспериментов, где податливый элемент испытывается на прессовом оборудовании, а полученные результаты анализируются. Объем экспериментальных исследований может быть достаточно большим, особенно если задачей является оценка влияния изменений, вносимых в существующую конструкцию податливого элемента, на эффективность его работы. Уменьшить объем экспериментальной составляющей работ по обоснованию эффективности податливого элемента можно за счет внедрения численного эксперимента. Ниже на примере податливого элемента приведены основные подходы к выполнению такого эксперимента и последовательность его проведения.

Численный эксперимент должен надежно отражать все особенности реального эксперимента, а также поведения материала испытываемой конструкции и собственно конструкции как механической системы.

Анализ работы податливого элемента набрызгбетонной обделки тоннеля, выполненного из стальной трубы [5], позволил выделить следующие требования к математическому моделированию, на основе которого будет осуществляться численный эксперимент. Конструкция податливого элемента при нагружении испытывает значительные деформации (до 50 % и более), при которых очевидным является развитие пластических деформаций в податливом элементе. Другой особенностью работы податливого элемента под нагрузкой является локальный характер потери устойчивости его сечением. Такая потеря устойчивости сопровождается последующим повышением сопротивления сечения деформациям, вплоть до достижения величиной возникающих в податливом элементе усилий критических значений, превышение которых ведет к новой потери устойчивости, но уже в другом сечении. Процесс может повторяться несколько раз,

при этом сам податливый элемент принимает форму гофрированной трубы. В процессе деформирования податливого элемента его внутренняя и наружная поверхности вступают в контакт сами с собой.

Таким образом, видно, что в процессе выполнения виртуального численного эксперимента реализуются все три возможных вида нелинейности: физическая, геометрическая нелинейности и контактное взаимодействие. При этом деформации податливого элемента настолько высоки, что задачу следует отнести к классу высоко нелинейных квазистатических задач.

В настоящее время в практике численных расчетов механики сплошной среды получили распространение два метода: метод конечных элементов (неявный метод численного анализа) и метод конечных разностей (явный метод численного анализа). Для успешного решения поставленной задачи возможно применение обоих методов, но предпочтительным для такого класса задач является метод конечных разностей. Метод конечных элементов, несмотря на свою универсальность, при решении высоконелинейных задач может оказаться неэффективным. Появление локальной неустойчивости податливого элемента приводит к изменению знака на кривой «усилие – перемещение», что значительно сказывается на скорости сходимости решения, а также может вызвать его расхождение. Для улучшения сходимости решения могут быть использованы различные подходы, например, метод Рикса или введение искусственной вязкости в систему и др. Однако эти меры не всегда позволяют получить решение для высоконелинейных задач. В отличие от неявных методов численного анализа, явный метод достаточно хорошо справляется со всеми видами нелинейностей [6].

В работе рассмотрен пример реализации численного эксперимента, выполненного в среде программного комплекса ABAQUS, однако не существует никаких ограничений для повторения такого численного эксперимента в любом другом программном продукте, реализующем явный метод численного анализа.

При явном методе численного анализа уравнение движения записывается в форме приращений следующим образом:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{P} - \mathbf{I}, \qquad (1)$$

где $\mathbf{M}$ – узловая матрица масс; $\ddot{\mathbf{u}}$ – вектор узловых ускорений; $\mathbf{P}$ – вектор внешних сил; $\mathbf{I}$ – вектор внутренних сил.

Ускорение в начале данного инкремента t вычисляется как

$$\ddot{\mathbf{u}}\Big|_{(t)} = (\mathbf{M})^{-1}(\mathbf{P}-\mathbf{I})\Big|_{(t)}. \qquad (2)$$

Проинтегрировав ускорения по времени и воспользовавшись правилом центрального дифференцирования, получим изменение скорости при постоянном ускорении. Для того, чтобы определить скорость в середине данного инкремента, изменение скорости добавим к величине скорости, полученной в середине предыдущего инкремента,

$$\dot{\mathbf{u}}\Big|_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} = \dot{\mathbf{u}}\Big|_{\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)} + \frac{\left(\Delta t\big|_{(t+\Delta t)} + \Delta t\big|_{(t)}\right)}{2}\ddot{\mathbf{u}}\Big|_{(t)}. \qquad (3)$$

Проинтегрировав скорость по времени и добавив перемещения на начало инкремента, получим перемещения на конец инкремента

$$\mathbf{u}\Big|_{(t+\Delta t)} = \mathbf{u}\Big|_{(t)} + \Delta t\Big|_{(t+\Delta t)}\dot{\mathbf{u}}\Big|_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)}. \qquad (4)$$

Далее выполняется вычисление приращений деформаций внутри элементов, приращений напряжений и осуществляется сборка узловых внутренних сил.

Для получения точного результата размер инкремента должен быть достаточно малым (таким, чтобы ускорение практически не изменялось в течение инкремента). Так как вычислительные затраты на нахождение неизвестных в каждом инкременте несущественны, то общее время расчета при решении высоконелинейных квазистатических задач является вполне приемлемым по сравнению с аналогичными временными затратами при использовании неявных методов численного анализа.

Рассмотрим следующий виртуальный эксперимент. Податливый элемент, выпол-

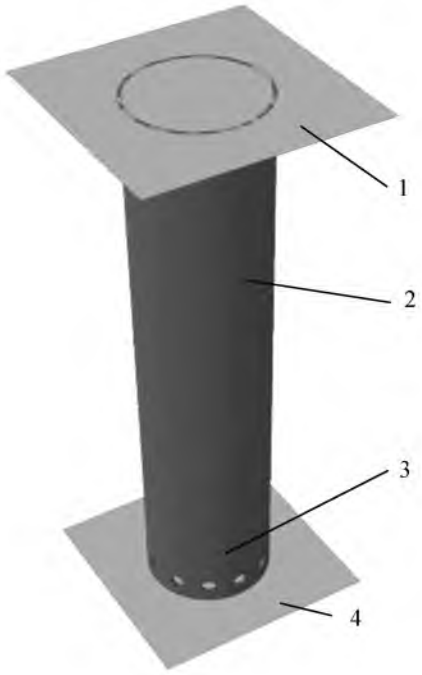


Рис. 3. Податливый элемент, расположенный между нагружающей и опорной пластинами

1 – нагружающая пластина; 2 – податливый элемент; 3 – участок ослабления сечения податливого элемента; 4 – опорная пластина

ненный в виде трубы с отверстиями (рис.3), расположенными в его нижней части, в начальный момент времени зажат между жесткими пластинами в продольном направлении. Пластины моделируются абсолютно жесткими элементами или элементами с деформационными показателями материала на порядок выше деформационных свойств материала податливого элемента. Податливый элемент удобно представить сплошными конечными элементами второго порядка или элементами первого порядка с несовместной формулировкой. Так как в податливом элементе при его деформировании будут одновременно возникать напряжения растяжения-сжатия, изгиба и кручения, для получения достоверного решения с использованием элементов первого порядка, плотность дискретизации должна быть достаточно высокой. Размер конечного элемента подбирается, исходя из каждого конкретного виртуального перемещения.

Между нагружающей пластиной и податливым элементом, а также между опорной пластиной и податливым элементом необходимо установить контактное взаимодействие. Это позволит результатам виртуального численного эксперимента приблизиться к реальной работе податливого элемента при его испытании на прессовом оборудовании. Коэффициент трения между пластинами и податливым элементом ориентировочно можно принимать равным 0,3 (коэффициент трения стали по стали).

Нагружение податливого элемента выполняется по схеме заданных деформаций. В узлах нагружающей пластины задаются вынужденные перемещения, при этом смещения в двух других плоскостях, перпендикулярных направлению движения нагружающей пластины, запрещаются. Перемещения всех узлов опорной пластины запрещаются.

Явный метод анализа по своей сути является динамическим методом, поэтому для обеспечения условия квазистатического состояния необходимо соблюдать два условия. Первое условие – время рассматриваемого процесса должно быть достаточно большим по отношению к скорости приложения граничных условий. Второе условие – скорость приложения граничных условий, изменяющихся во времени, в начальный период времени должна начинаться от нулевого значения, а приращение скорости приложения граничных условий должно выполняться плавно, с постепенным возрастанием до постоянного значения. При этом формируется участок набора скорости приращения при переходе от нулевого значения и участок спада скорости приращения при выходе на постоянное значение граничного условия. В данном случае под граничным условием понимаются заданные перемещения нагружающей пластины.

Характер деформирования податливого элемента представлен на рис.4. Сравнивая полученные результаты с экспериментальными исследованиями, приведенными в работе [5], можно отметить их качественное совпадение. Как видно, податливый элемент в процессе нагружения формирует складчатую структуру. Происходит локальная потеря устойчивости стенки податливого элемента с последующим его переходом в нормальный режим работы.

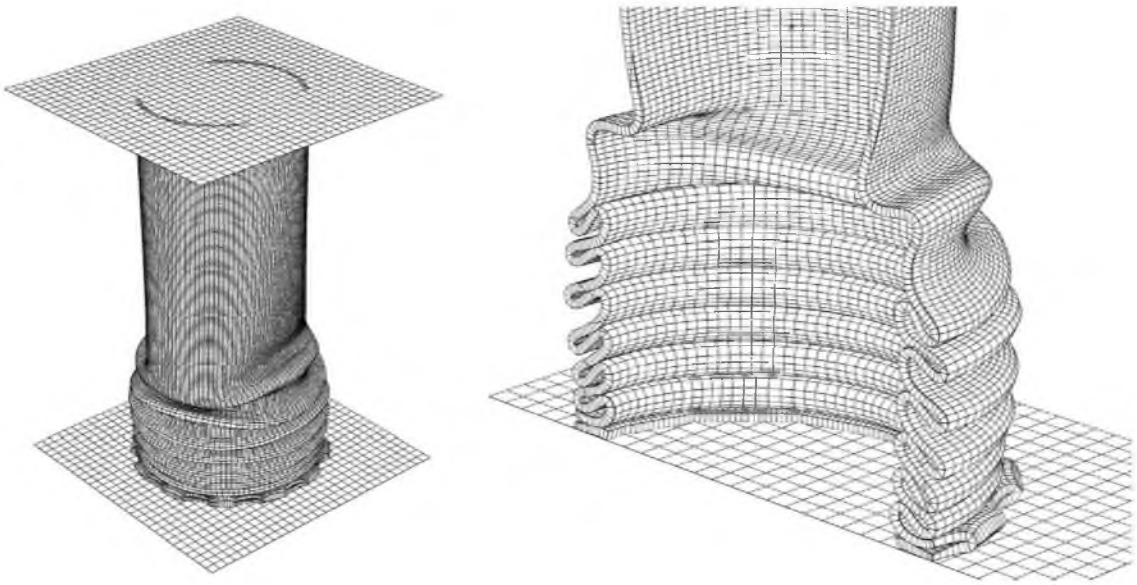


Рис.4. Деформированное состояние податливого элемента

Количественную оценку работы податливого элемента можно представить в виде зависимости, характеризующей режим работы податливого элемента. Представлены характеристики работ для четырех типоразмеров податливых элементов с толщиной стенки 1, 2, 3 и 4 мм соответственно. Из диаграммы (рис.5) отчетливо видны моменты локальной потери устойчивости податливого элемента и последующего его перехода в нормальный режим работы. Количественная оценка достоверности полученных результатов численного моделирования представляется затруднительной, так как экспериментальные исследования авторами работы пока не проводились. Лабораторные испытания податливого элемента будут выполняться на соответствующем прессовом оборудовании и дадут возможность оценки сходимости результатов во всем диапазоне работы податливого элемента и в случае необходимости уточнения параметров разработанной численной модели.

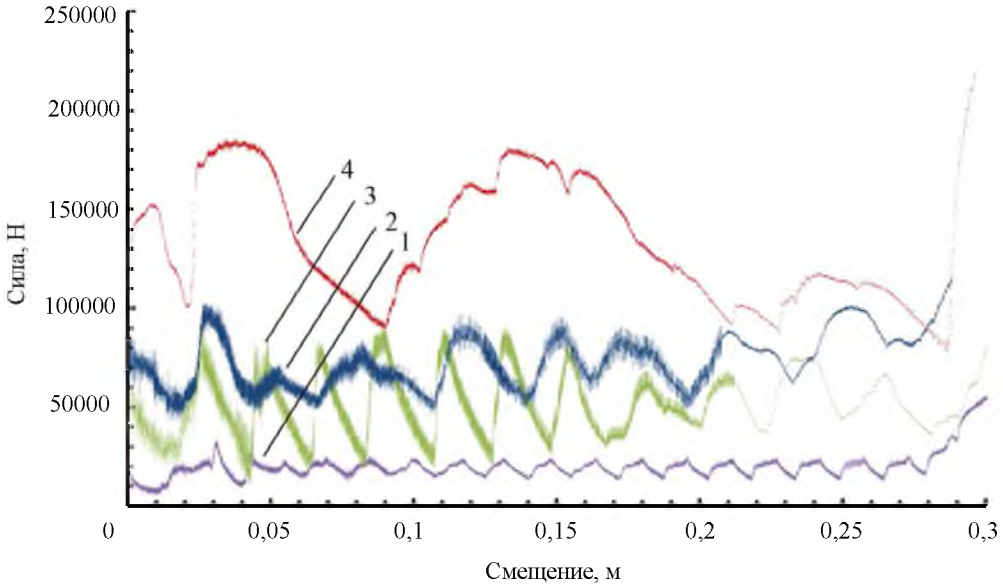


Рис. 5. Характеристика работы податливого элемента

1, 2, 3, 4 – толщина стенки податливого элемента соответственно 1, 2, 3, 4 мм

Предложенный подход позволяет получить базовую информацию о режиме работы податливого элемента при различных соотношениях между его геометрическими параметрами, такими как высота, диаметр и толщина стенки. Анализ полученных результатов позволяет подобрать необходимый типоразмер податливого элемента для конкретных инженерно-геологических условий и параметров набрызгбетонной крепи тоннеля. И хотя численный эксперимент не может полностью заменить физические лабораторные и натурные испытания, он дает возможность выполнить ориентировочную оценку, что в конечном итоге позволяет значительно сократить временные и материальные затраты.

Работа выполнена на основании государственного контракта № П1127 от 2 июня 2010 г. по Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.1.2.2. Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук. Наименование проекта: «Геомеханическое обоснование способов повышения устойчивости тоннелей различного назначения, пройденных в тектонически нарушенных массивах».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Anagnostou G.* Design and analysis of yielding support in squeezing ground / G.Anagnostou, L.Cantieni // 11th ISRM Congress. The Second Half-Century of Rock Mechanics. Lisbon, Portugal, 2007.

2. *Barla G.* Design analyses for tunnels in squeezing rock // Proc. 11th International Conference of IACMAG. Torino, Italy, 2005.

3. *Barla G.* Modelling of tunnels in squeezing rock / G.Barla, M.Bonini, D.Debernardi // Proc. ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunnelling. Vienna, Austria, 2007.

4. *Thut A., Steiner P., Stolz M.* Tunnelling in Squeezing Rock-Yielding Elements and Face Control // 8th International Conference on Tunnel Constructions and Underground Structures. Ljubljana, Slovenia, 2006.

5. *Shebert W., Moritz B., Pottler R.* Highly deformable shotcrete lining design and experience // Proceedings of the International Conference Shotcrete for Underground Support VIII. Campos do Jordao, Brazil, 1999.