

Предложенный метод Международного Общества Механиков Горных Пород (ISRM) для Лабораторного Определения Сопротивления Сдвигу Прочности Скальной Породы по Трещине: Пересмотренный вариант

Хосе Муралья • Джованни Грасселли •
Брайан Татоне • Манфред Блюмель •
Панайотис Хриссантакис • Цзян Юйцзин

Опубликовано онлайн 30 ноября 2013 г.
© Springer-Verlag Wien 2013

1 Введение

Термин "разрыв" относится к любому механическому разлому в массиве горных пород с незначительным пределом прочности при растяжении (Прист 1993). Разрывы могут иметь геологическое происхождение (разломы, слоистость, сланцеватость, плоскости спайности и складчатость) или антропогенное происхождение (разломы, вызванные взрывом, нагрузками или гидравлическим воздействием).

Независимо от их происхождения, разрывы играют важную роль в поведении массивов горных пород и, следовательно, в реализации ряда проектов в области горного строительства

Пожалуйста, присылайте любые письменные комментарии по данному Предлагаемому Методу ISRM профессору Ресату Улусаю, президенту комиссии ISRM по методам испытаний, Университет Хачеттепе, Факультет Геологического Строительства, 06800 Бейтепе, Анкара, Турция.

Х. Муралья (✉)
Отдел бетонных плотин, LNEC, Национальная лаборатория гражданского строительства, Ав. Бразилия, 1700-066 Лиссабон, Португалия
e-mail: jmuralha@lnec.pt

Г. Грасселли Б. Татоне
Факультет гражданского строительства, Университет Торонто, 35 улица Сент-Джордж, Торонто, ON M5S 1A4, Канада

М. Блюмель
Институт механики горных пород и туннелирования, Геотехническая группа Грац, Технологический университет Граца, Рехбауэрштрассе 12, 8010 Грац, Австрия

П. Хриссантакис
НГИ, Норвежский геотехнический институт, Согнсвейен 72, Уллевал Хагеби, почтовый ящик 3930, 0806 Осло, Норвегия

Ц. Юйцзин
Кафедра гражданского строительства, инженерный факультет, Университет Нагасаки, 1-14 Бункё-Чо, Нагасаки 852-8521, Япония

включающих склоны, поверхностные выработки и подземные проемы, такие как туннели или каверны. Нарушения в массивах горных пород, вызванные разрывами, представляют собой серьезную опасность в проектах гражданского и горного строительства, так как они являются причиной многих аварий и дорогостоящих задержек в строительстве/производстве.

Для оценки риска, создаваемого этими блочными системами для конкретного проекта, требуется проведение оценки сопротивления сдвигу скальных разрывов. Результаты оценки сопротивления сдвигу могут быть получены с помощью испытаний на сдвиг. Наилучшие оценки сопротивления сдвигу получаются при непосредственных испытаниях на месте, поскольку они учитывают возможный эффект масштаба (Барла и др. 2011; Алонсо и др. 2011). Однако из-за длительности и стоимости таких испытаний, как правило, вместо них проводятся лабораторные тесты на сдвиг на относительно небольших образцах разрывов.

Традиционно испытания на прямой сдвиг проводятся при постоянной нормальной нагрузке, приложенной к плоскости разрыва. Хотя это ограничивающее условие подходит для ряда инженерных задач, связанных со скольжением блоков породы вблизи поверхности земли (например, устойчивость скального склона и устойчивость поверхностных выработок), существует класс задач, в которых нормальное напряжение может не оставаться постоянным по мере скольжения. В частности, каждый раз, когда расширение разрыва ограничивается во время скольжения (например, вокруг подземной выработки), нормальное напряжение на поверхности скольжения может меняться. Для этого класса задач граничное условие с постоянной нормальной жесткостью более подходит для испытаний на прямой сдвиг (Джонстон и Лам 1989; Лейхниц 1985).

2 Область применения

(a) Настоящий Предлагаемый Метод (ПМ) является пересмотренным и усовершенствованным вариантом Части 2. Предлагаемый Метод для лабораторного определения сопротивления прямого сдвига, включенный в

Предлагаемые Методы для определения сопротивления сдвигу (ISRM 2007), и был подготовлен с учетом технологических достижений, произошедших со времени его первоначальной публикации, и других существующих стандартных методов, включая D 5607-08 Американского Общества по Испытанию Материалов (ASTM) (ASTM 2008), USACE RTH 203-80 (USACE 1980) и JGS 2541-2008 (JGS 2008).

(b) Указанные ПМ направлены на рассмотрение требований и лабораторных процедур для проведения испытаний на сопротивление прямому сдвигу скальных разрывов с использованием лабораторного оборудования с постоянной нормальной нагрузкой и постоянной нормальной жесткостью. Этот тип испытания можно также назвать испытанием на трение скольжения.

(c) Данные ПМ ограничены определением квазистатического сопротивления сдвигу разрывов при монотоническом сдвиговом нагружении. Процедуры для циклического и динамического сдвигового нагружения в данном документе не рассматриваются.

(d) Разрывы могут быть открытыми или практически закрытыми и должны демонстрировать незначительную прочность на растяжение. Данный ПМ не предназначен для проведения испытаний на прямой сдвиг неповрежденной породы или других типов естественных или искусственных разрывов, которые демонстрируют прочность на растяжение, например, стыки между породой и бетоном или швы подъема бетона.

(e) Разрывы также могут быть частично или полностью заполнены зальбандом или глиной. Настоящий ПМ не предназначен для испытаний разрывов с зальбандом или глиной, при которых необходимо учитывать условия давления поровой воды на месте.

(f) Данный ПМ предлагает измерять пиковую и предельную или остаточную прочность при прямом сдвиге в выбранном направлении как функцию нормальной напряженности, приложенного к плоскости сдвига. Результаты могут быть использованы, например, при анализе предельного равновесия блоков породы в откосах или боковых стенках подземных выработок, а также в качестве входных параметров для "совместных" элементов при континуальном и прерывистом численном моделировании блочных массивов породы.

(g) Прочность на сдвиг скальных разрывов может быть определена испытаниями в условиях постоянной нормальной нагрузки (ПНН) или в условиях постоянной нормальной жесткости (ПНЖ). При использовании испытаний на сдвиг с постоянной нормальной нагрузкой проверяется не прочность соединения, а сопротивление сдвигу при определенной нормальной нагрузке, что может быть целесообразно для целей проектирования при определенных граничных условиях. Процедуры испытаний на постоянную нормальную жесткость могут быть использованы для определения предельной прочности соединения на сдвиг. Несмотря на то, что они не учитывают, что нормальная жесткость, скорее всего, увеличится при дилатантном сдвиге, испытания ПНЖ предпочтительно использовать для воспроизведения естественной реакции на простой сдвиг непланарных разрывов.

(h) В условиях ПНН определение сопротивления сдвигу обычно включает в себя приложение нескольких различных по величине ПНН или напряжений к нескольким образцам из одного и того же соединения или горизонта испытания и измерение напряжений сдвига и соответствующих сдвиговых и нормальных смещений, возникающих в результате предписанной скорости сдвига. По меньшей мере три, но предпочтительно пять, образцов из одного и того же соединения или горизонта испытания с аналогичными характеристиками должны быть отобраны и испытаны вдоль одного и того же направления сдвига.)

(i) В тех случаях, когда невозможно отобрать достаточно большое количество образцов, в качестве альтернативы можно провести многократные испытания одного и того же образца при различных условиях ПНН. Для одного скального соединения следует использовать не менее трех, но предпочтительнее пять различных нормальных нагрузок. Такой многоступенчатый подход применим только в том случае, если разрушение и деградация поверхности стыка от последующих стадий сдвига минимальны (например, при низких нормальных напряжениях). Чтобы минимизировать влияние повреждений и износа, на каждом последующем этапе сдвига следует применять все более высокие показатели нормальной напряженности.

(j) В условиях нагружения с ПНЖ определение прочности при сдвиге обычно включает испытание нескольких образцов из одного и того же соединения или горизонта испытаний при различных начальных нормальных нагрузках и/или постоянной нормальной жесткости, а также измерение напряжений сдвига и нормальных напряжений и соответствующих смещений, возникающих при заданной скорости сдвига. По крайней мере, три, но предпочтительно пять, образцов из одного и того же соединения или горизонта испытаний должны быть отобраны и испытаны вдоль одного и того же направления сдвига.

3 Устройство

3.1 Испытательное оборудование

(a) Определение сопротивления сдвигу скальных разрывов обычно выполняется с помощью приборов прямого сдвига. Хотя существует много различий в способах подготовки, установки и нагружения образцов, тем не менее, определение прочности при сдвиге обычно схоже (Булон 1995; Блюмель и Поэтш 2003; Цзян и др. 2004; Барла и др. 2010). Обычно в состав машин для испытаний на прямой сдвиг входят (Рис.1):

i. Система для тестирования жесткости, включающая в себя раму жесткости, на которую могут воздействовать нагружающие устройства, и держатель жесткого образца, обладающий достаточной жесткостью для предотвращения деформации во время испытания. Система жесткости позволяет поддерживать предписанную скорость сдвига и надлежащим образом регистрировать поведение соединения после пиковой нагрузки.

ii. Держатель образца, такой как срезная коробка, срезные кольца или аналогичное устройство, где обе половины образца закреплены. Это должно обеспечивать относительное сдвиговое и нормальное смещение двух половин разрыва. Силы трения по периметру держателя образца должны быть минимизированы с помощью роликов или других подобных устройств с низким коэффициентом трения.

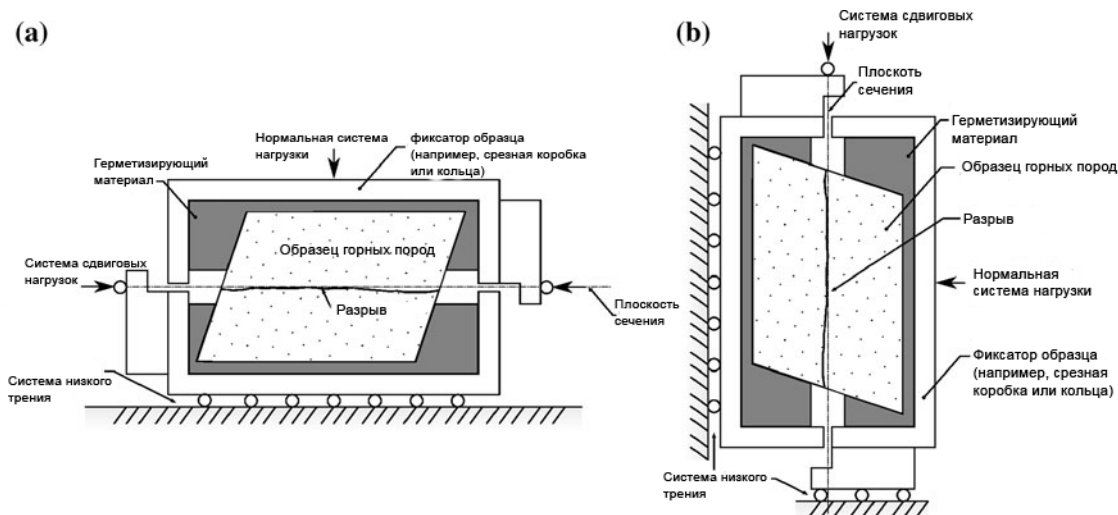


Рис. 1 Схема, иллюстрирующая расположение лабораторного образца для прямого сдвига: а) обычное горизонтальное расположение и б) альтернативное вертикальное расположение

iii. Нагрузочные устройства для приложения нормальной и сдвиговой нагрузок к образцам с достаточной скоростью и с таким расчетом, чтобы результат сдвиговой нагрузки проходил через центральную часть зоны сдвига для минимизации вращения образца.

iv. Устройства для измерения нормальной и сдвиговой нагрузки, приложенной к образцу, а также нормального и сдвигового смещения в течение всего испытания.

3.2 Нагрузка

(a) Приложенные усилия на сдвиг обычно обеспечиваются приводами [гидравлическими, пневматическими, механическими (с зубчатым приводом) и т.д.] с замкнутым контуром управления или без него. Приводы сдвига и соединительные детали должны быть спроектированы таким образом, чтобы нагрузка сдвига равномерно распределялась по плоскости разрыва, подлежащей испытанию, а возникающая сила действовала параллельно плоскости сдвига через ее центральную часть.

(b) Прикладываемая ПНН или ПНЖ обычно обеспечивается приводами (гидравлическими, пневматическими, механическими и т.д.) с замкнутым контуром управления или без него. Приводы нормальной силы и соединительные детали должны быть сконструированы таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение нагрузки по плоскости разрыва, подлежащей испытанию. Они должны обеспечивать перемещение, превышающее величину расширения, ожидаемого при испытании, и обеспечивать равномерное распределение приложенной нормальной нагрузки по горизонту испытания с результатом силы, действующей перпендикулярно плоскости сдвига через ее центральную часть.

(c) Консольная система также может быть использована для приложения постоянной нормальной нагрузки собственного веса для испытаний ПНН при низких нормальных напряжениях и нулевой нормальной жесткости (Хенчер и Ричардс 1982), в то время как пружина может быть использована для поддержания постоянного состояния нормальной жесткости для испытаний ПНЖ (Индрадатна и др. 1999).

(d) Поддержание нормальной нагрузки или жесткости важно при проведении тестов на сдвиг. В соответствии с требованиями, нагрузочный компонент оборудования должен быть разработан для поддержания приложенной силы или жесткости в пределах установленного допуска (± 2 %).

3.3 Учет Нагрузки и Смещения

(a) Нормальные и сдвиговые силы измеряются с точностью более ± 2 % непосредственно датчиками нагрузки или косвенно с помощью манометров, преобразователей или кольцевых динамометров. Для измерения смещений используются датчики смещения.

(b) Требуется минимум два датчика: один устанавливается параллельно плоскости сдвига для измерения сдвигового смещения и один устанавливается вертикально в центре образца для измерения нормального смещения. Предпочтительно использовать два датчика для измерения сдвига, чтобы можно было измерить рысканье образца, и три-четыре датчика для измерения горизонтального смещения, чтобы можно было оценить крен и тангаж образца.

(с) Существует обычная практика проведения почти непрерывных измерений (частота дискретизации более 1 Гц) этих параметров с использованием определенного компьютерного оборудования для сбора данных, что приемлемо для квазистатических условий нагружения, рассматриваемых в ПМ.

(d) Для гарантии того, что нагрузки эффективно прикладываются к поверхности сдвига, удобным может оказаться измерение сил трения или проведение испытания на муляже перед реальными тестами. Если требуются поправки, о них следует сообщить.

4 Образцы для Тестирования

4.1 Отбор проб, Обработка и Хранение

(a) Отбирается тестовый горизонт, регистрируются направление наклона, направление падения и другие соответствующие геологические характеристики. Если возможно, абсолютная ориентация образца относительно тестового горизонта должна быть отмечена на образце (например, ориентированный керн). При этом направление сдвига в лаборатории может быть выбрано таким образом, чтобы соответствовать конкретному интересующему направлению смещения на месте.

(b) Образцы блоков или керна, содержащие тестовый горизонт, отбираются с использованием методов, выбранных для минимизации нарушений. Размеры образца и расположение тестового горизонта в блоке или керне должны, по возможности, позволять установку без дальнейшей подрезки в лаборатории и обеспечивать достаточный зазор для адекватной герметизации.

(с) Никакие жидкости, кроме воды, не должны контактировать с образцом перед испытанием. Образцы разрывов, которые, как представляется, были загрязнены буровым раствором или имеют неестественный износ поверхности, должны быть отбракованы.

(d) Образцы должны быть промаркированы и упакованы во избежание повреждения при транспортировке в лабораторию. Особое внимание следует уделить предотвращению дифференциального движения вдоль отобранного разрыва. Один из вариантов предотвращения дифференциального движения включает связывание стенок разрыва вместе проволокой или лентой, которая должна оставаться в таком положении непосредственно перед испытанием. Если образцы не будут немедленно доставлены в лабораторию, их следует хранить в защищенном от погодных условий месте, чтобы сохранить их целостность. Поскольку образцы должны испытываться в условиях естественной влажности, их следует хранить и перевозить во влагонепроницаемых контейнерах. В качестве альтернативы можно использовать ленту, пластиковую пленку, воск или другие средства для сохранения влажности на месте тестирования. Хрупкие образцы требуют специальной обработки, например, упаковки в пенополиуретан (Стипсон и др., 1970).

(e) В лаборатории обращение с образцами и их хранение должно осуществляться в соответствии с вышеупомянутыми мерами, чтобы избежать любого повреждения образцов и при необходимости сохранить содержание влаги на месте.

4.2 Размер и Форма

(a) Предпочтительны образцы с регулярной (прямоугольной или эллиптической) площадью поперечного сечения. Однако образцы могут иметь любую форму, так что площадь поперечного сечения может быть определена с требуемой точностью.

(b) Высота образца должна превышать толщину зоны сдвига (теста) и быть достаточной для помещения образца в фиксатор образца.

(с) Длина испытательной плоскости (измеренная вдоль направления сдвига) должна быть не менее чем в 10 раз больше максимальной неровной высоты.

(d) Ширина испытательной плоскости (измеренная перпендикулярно направлению сдвига) должна иметь не менее 48 мм, что соответствует разрывам, полученным из кернов NQ.

(e) Ширина испытательной плоскости не должна значительно изменяться по длине сдвига. Минимальная ширина должна составлять более 75 % от максимальной ширины.

(f) Половина образца, которая остается зафиксированной во время испытаний на сдвиг, должна иметь большую длину, чем подвижная половина, чтобы соединение всегда поддерживалось и номинальная площадь контакта оставалась постоянной. Если эта процедура невыполнима из-за уменьшения длины образца, в расчетах необходимо учесть уменьшение номинальной площади при сдвиге.

4.3 Наблюдения и Измерения Пробы и Образца

(a) Все характеристики поверхности разрывов, которые могут повлиять на сопротивление сдвигу, включая изменения, покрытия, напластования и т.д., должны оцениваться в соответствии с методикой, описанной в Предложенном Методе ISRM для количественного описания разрывов в массивах горных пород (ISRM 2007).

(b) Обе стенки испытываемого образца должны быть засняты на фотокамеру до и после испытания. Также важно измерить топографию обеих стенок испытываемого образца до и после испытания для оценки шероховатости поверхности и износа шероховатости. Для этой цели можно использовать два типа оборудования:

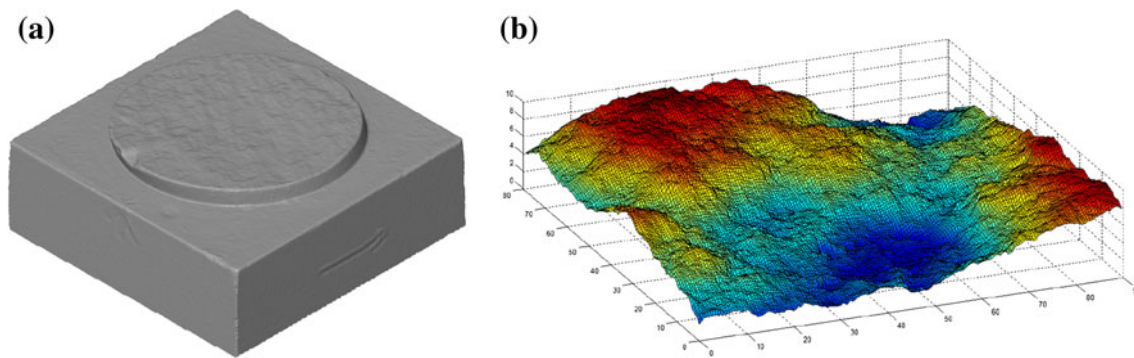


Рис. 2 Примеры измерения стыковочных поверхностей: а) круговая, б) прямоугольная

i Проклонометры - это простые устройства, которые производят серию линейных профилей шероховатости поверхности образца вдоль направления сдвига и поперечного направления. Количество профилометров зависит от размера поверхности, но следует наносить на карту не менее трех в каждом направлении (Эйдан и др. 1992; Грасселли 2001).

ii Если есть возможность, для оцифровки всей поверхности разрыва можно использовать трехмерные бесконтактные измерительные устройства (например, лазерный сканер, щелевой сканер, фотограмметрию или стерео-топометрическую камеру) (рис. 2). Такие системы способны получать точечные измерения с номинальным шагом $0,5$ мм с точностью лучше $0,025$ мм (Татоне и Грасселли 2009).

(c) Измерение номинальной площади поперечного сечения плоскости сдвига образца должно производиться перед каждым испытанием с точностью до $2,5$ мм². Для образцов правильной геометрической формы соответствующие размеры, необходимые для расчета номинальной площади поперечного сечения, могут быть измерены с помощью штангенциркуля или микрометра. Для неправильных форм контур поперечного сечения может быть прорисован на бумаге, а площадь измерена с помощью планиметра или аналогичного прибора. Площадь также может быть измерена с помощью трехмерного бесконтактного измерительного устройства и программного обеспечения CAD.

4.4 Инкапсуляция Образцов

(a) Для испытания образца с разрывами каждая половина образца должна быть закреплена в каждой половине фиксатора образца (т.е. срезных кольцах или срезных коробках). Поскольку образцы с разрывами редко вырезаются так, чтобы они идеально помещались в фиксатор образца, они должны быть заключены в какой-либо другой заливочный материал (например, цемент, смолу или аналогичный материал) для обеспечения плотного прилегания. Инкапсуляция также позволяет плоскости



Рис. 3 Изоляция нижней половины образца для испытаний прямоугольной формы

разрыва совмещаться с плоскостью сдвига. Образцы могут быть заключены непосредственно в фиксатор образца испытательного устройства или, если необходимо подготовить несколько образцов одновременно, можно использовать разъемную форму (формы) с размерами, идентичными размеру фиксатора образца. Хотя допускается некоторая корректировка, герметизация образца для испытания должна происходить следующим образом:

i. Извлечь образец из упаковки.

ii. Расположите нижнюю половину образца по центру в нижней половине фиксатора образца. Убедитесь, что испытываемый горизонт сдвига закреплен и что он параллелен плоскости сдвига и правильно ориентирован относительно направления сдвига. Убедитесь, что положение образца может быть сохранено во время заливки и отверждения герметизирующего материала.

iii. Залейте герметизирующий материал, приготовленный в соответствии с указаниями производителя,

осторожно в пространство между нижней половиной образца и нижней половиной фиксатора образца. Остановите заливку чуть ниже общей плоскости зоны испытания. Убедитесь, что зона около 5 мм по бокам от плоскости сдвига остается свободной от герметизирующего материала. После заливки не перемещайте фиксатор образца до полного затвердевания герметизирующего материала.

iv. После достаточного отверждения нижнего герметизирующего материала поместите на нижний фиксатор разъемную распорную пластину определенной толщины так, чтобы ее вырезанный край обхватывал нижнюю половину образца и обхватывал толщину зоны тестирования. Для этой цели можно также использовать крупнозернистый песок или модельную глину. При необходимости нанесите слой силиконовой смазки на поверхность герметизированного материала. Поместите верхнюю половину образца для испытания на нижнюю половину герметичного материала. Убедитесь, что между двумя половинками достигнуто плотное прилегание. Опустите верхнюю половину держателя образца на разъемную распорную пластину, не нарушая положения верхней половины образца. Соедините две половины держателя образца. Залейте герметизирующий состав в кольцевое пространство между верхней половиной держателя образца и верхней половиной образца. Не трогайте сборку до тех пор, пока герметизирующий состав не затвердеет.

v. Уберите распорные плиты, песок или глину, чтобы обнажить испытательный горизонт для тестирования на сдвиг (Рис. 3).

(c) После герметизации следует подтвердить, что усредненная плоскость через горизонт испытания параллельна верхней и нижней поверхности фиксатора образца (т.е. плоскости сдвига). Любое угловое отклонение между средней плоскостью и плоскостью сдвига, измеренное в направлении сдвига, должно быть измерено и зафиксировано. Это угловое отклонение также должно быть учтено при определении сопротивления сдвигу.

5 Процедура Тестирования

5.1 Предварительные Задачи

(a) Перед проведением испытаний необходимо определить условия нагружения и диапазон нормальных нагрузок, прикладываемых при сдвиге, в соответствии с нормальными напряжениями, которые, как ожидается, будут действовать на соединения в рассматриваемом проекте (например, откос, основание плотины, подземная пещера или туннель).

(b) В случае необходимости можно провести испытания на муляжах образцов с низкой степенью деформации, например стальных, с теми же размерами, что и настоящие образцы, и заключенных в герметичную оболочку в соответствии с этой же процедурой. Тестирование муляжей состыкованных образцов позволяет установить, что все устройства работают правильно, и может позволить провести калибровку измерительных приборов. Тестирование неповрежденных образцов также позволяет оценить жесткость системы нормального и сдвигового нагружения и, в конечном итоге, внести соответствующие коррективы (Хриссантакис 2004).

5.2 Монтаж Образцов

(a) Установите и закрепите герметичный образец внутри подвижного и неподвижного фиксаторов образца испытательной установки.

(b) Убедитесь, что все средства для измерения откалиброваны в соответствии с процедурами лабораторной калибровки.

(c) Протестируйте все устройства мониторинга, чтобы гарантировать их правильную функциональность и надлежащее подключение к системе сбора данных.

(d) Установите все устройства измерения смещения перпендикулярно поверхности сдвига так, чтобы они соприкасались с периметром подвижной половины фиксатора образца для измерения нормального смещения во время испытания. Обычно используется четыре устройства для измерения нормального смещения для оценки угла наклона и крена подвижной половины образца во время испытания. Хотя это не рекомендуется, можно использовать и меньшее количество измерительных приборов. В любом случае эти устройства должны быть распределены по периметру поверхности сдвига образца, чтобы обеспечить информацию, необходимую для оценки нормального смещения на центральной части поверхности сдвига.

(e) Установите устройства перемещения таким образом, чтобы измерять сдвиг образца во время проведения испытания. Следует использовать пару устройств, симметрично расположенных относительно поперечного сечения образца. Для некоторых установок может быть достаточно одного устройства, расположенного вдоль оси сдвига. Однако последний вариант не рекомендуется, поскольку возможное рыскающее движение образца не будет обнаружено.

(f) Убедитесь, что все устройства контроля перемещений имеют достаточный радиус действия для обеспечения нормальных и сдвиговых перемещений, ожидаемых при испытании. Кроме того, убедитесь, что эти устройства поддерживают контакт с фиксатором образца в течение всего испытания для правильного измерения перемещений.

(g) При необходимости установите и расположите все другие измерительные устройства, например, датчики нагрузки.

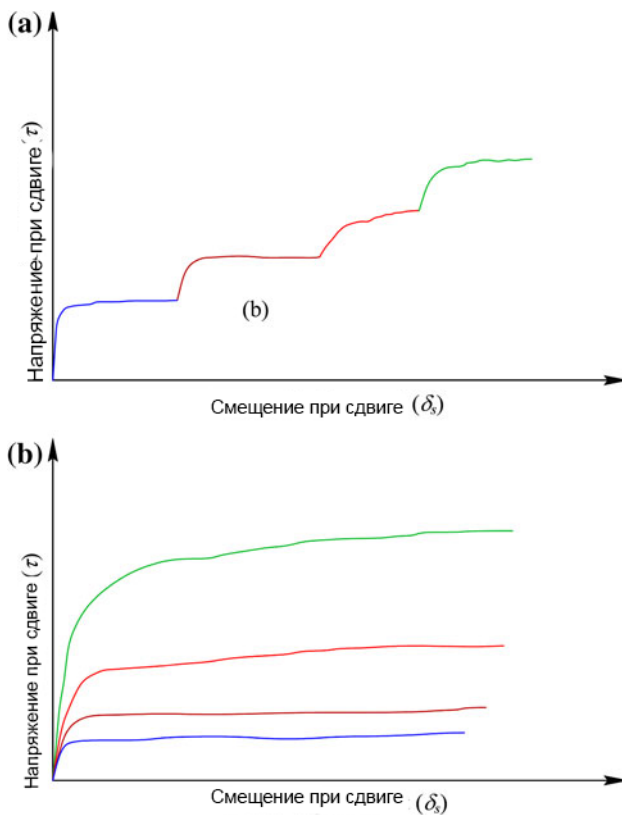


Рис. 4 Пример многоступенчатых испытаний на сдвиг при различных нормальных нагрузках, а) без перестановки и б) с перестановкой

5.3 Приложение Нагрузки

5.3.1 Нормальная Нагрузка

(а) Перед любым испытанием на сдвиг, приложение нормальной нагрузки должно состоять из непрерывного увеличения нагрузки, направленной по нормальному направлению к зоне сдвига, с постепенной скоростью до достижения заданного нормального напряжения, и регистрации последующих нормальных смещений.

(б) Нормальное приложение нагрузки должно осуществляться непрерывно с выбранной скоростью нормального напряжения, обеспечивая, таким образом, что каждый путь нагружения или разгрузки занимает около 5 мин. В соответствии с этим требуются скорости 0,01 МПа/с или менее.

(с) Любые нормальные нагрузки, передаваемые на испытательный горизонт системой нормального нагружения, должны учитываться при определении видимого нормального напряжения на образце, особенно при низких нормальных напряжениях. Например, если образец удерживается в горизонтальном положении в испытательном устройстве, следует учитывать вес верхней половины образца.

(д) Для тестов ПНН убедитесь, что испытательное устройство поддерживает заданную постоянную нормальную нагрузку в течение всего испытания. Для испытаний ПНЖ убедитесь, что испытательное устройство сохраняет заданную постоянную нормальную жесткость в течение всего испытания.

(е) Если это применимо, перед сдвигом дайте возможность рассеяться давлению поровой воды в породе и грунте, прилегающем к плоскости сдвига. Не прикладывайте нагрузку на срез до тех пор, пока нормальное смещение не стабилизируется.

5.3.2 Нагрузка на Сдвиг

(а) После стабилизации нормальных смещений под действием приложенной нормальной нагрузки, вызвать смещение сдвига непрерывно с выбранной скоростью смещения сдвига

(б) Сдвиг должен продолжаться с заданной скоростью до достижения предельного или остаточного напряжения сдвига. Как правило, достаточно сдвига в диапазоне от 5 до 10 % длины разрыва.

(с) Скорость сдвига в пределах 0,1-0,2 мм/мин обычно подходит для всего испытания, хотя она может быть немного увеличена до значений около 0,5 мм/мин после достижения пика прочности на сдвиг. В особых случаях, таких как соединения с тонкими глиняными покрытиями, может потребоваться более медленная скорость (менее 0,05 мм/мин).

5.4 Альтернативные Процедуры

(а) Определение прочности на сдвиг стыков горных пород может проводиться по двум различным методикам: процедура однократного сдвига и процедура многоступенчатого сдвига. Оба типа процедур могут выполняться в условиях ПНН или ПНЖ (Муралья 2007; Блюмель и др. 2003).

(б) Процедура однократного сдвига включает приложение нескольких постоянных нормальных напряжений к нескольким образцам из соединения или испытательного горизонта и измерение напряжений сдвига и соответствующих нормальных смещений, возникающих в результате предписанной скорости сдвига. Допускается получение по меньшей мере трех, а предпочтительно пяти образцов из одного и того же испытательного горизонта и испытание каждого из них в одном и том же направлении.

(с) Процедура многоступенчатого сдвига заключается в многократном испытании одного и того же образца при различных постоянных нормальных напряжениях. Для одного горного соединения необходимо приложить не менее трех, а предпочтительно пять, различных нормальных напряжений с испытанием на сдвиг в одном и том же направлении. Кроме того, можно использовать два возможных метода проведения многоступенчатых испытаний на сдвиг: без перестановки соединения в исходное естественное положение перед каждой стадией сдвига (Рис. 4а) или с перестановкой соединения в исходное естественное положение перед каждой стадией сдвига (Рис. 4б).

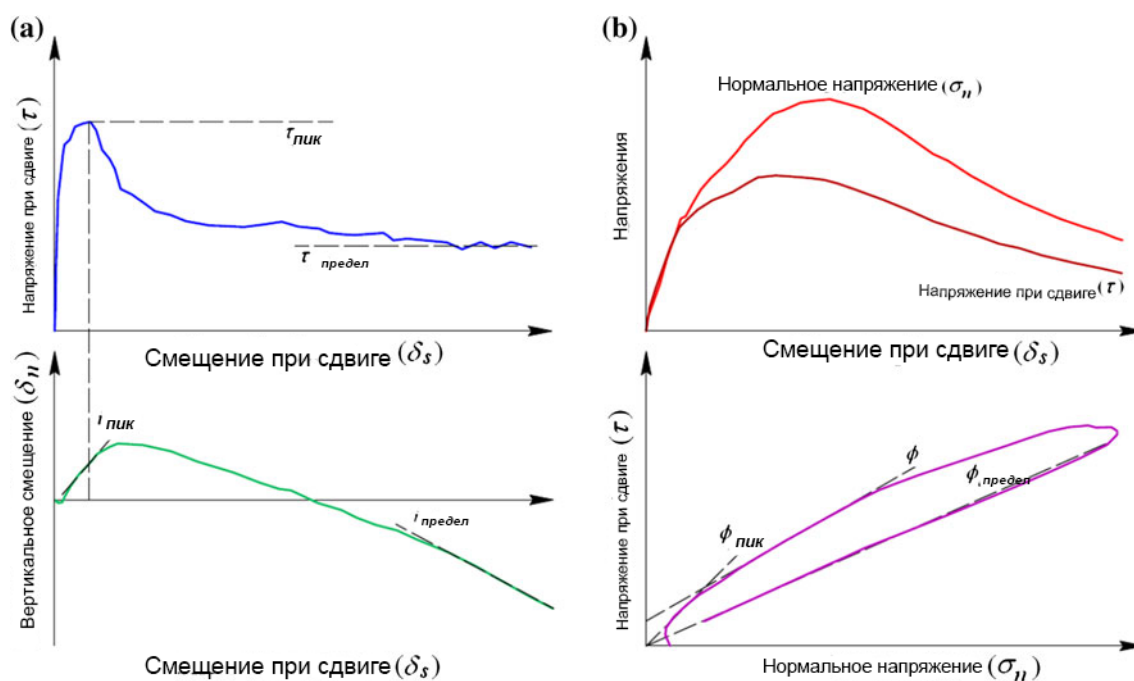


Рис. 5 Типичные графики испытаний на сдвиг соединения горных пород, а) при постоянных условиях нормальной нагрузки (ПНН) и б) при постоянных условиях нормальной жесткости (ПНЖ).

5.5 Измерения

5.5.1 Нормальное Смещение (δ_n)

(а) Измерить и зафиксировать нормальные смещения образца при каждом наблюдении нагрузки для определения нормального смещения образца соединения, как было описано ранее в Разд. 3.

(б) Рекомендуется использовать четыре измерительных устройства для контроля крена и тангажа испытываемого образца. Можно использовать меньшее количество измерительных приборов, но в любом случае они должны обеспечивать определение нормального смещения в центральной части поперечного сечения образца.

5.5.2 Смещение при сдвиге (δ_s)

(а) Измерить смещение образца на сдвиг при каждом наблюдении нагрузки для определения сдвига образца соединения, как было описано в Разд. 3.

(б) При этом рекомендуется использование двух измерительных устройств для контроля крена и тангажа испытываемого образца. Можно использовать меньшее количество измерительных приборов, но в любом случае они должны позволять определить нормальное смещение в центральной части поперечного сечения образца.

5.5.3 Нормальная нагрузка (N)

(а) Если нормальный механизм нагрузки не является нагрузкой от собственного веса (т.е. для испытаний ПНН),

произведите измерение приложенной нормальной нагрузки при каждом наблюдении сдвиговой нагрузки с помощью устройства для измерения нагрузки. Нормальная нагрузка должна постоянно контролироваться во время испытаний.

5.5.4 Нагрузка при Сдвиге (T)

(а) Произведите измерение приложенной нагрузки при сдвиге с помощью устройства для измерения нагрузки. Выбранная частота измерений должна быть достаточной для полного отражения реакции образца на смещение нагрузки. Эта частота зависит от характера образца и скорости сдвига. Как правило, достаточно измерения каждые 1 с или менее в течение всего испытания.

6 Расчеты, Графики и Результаты

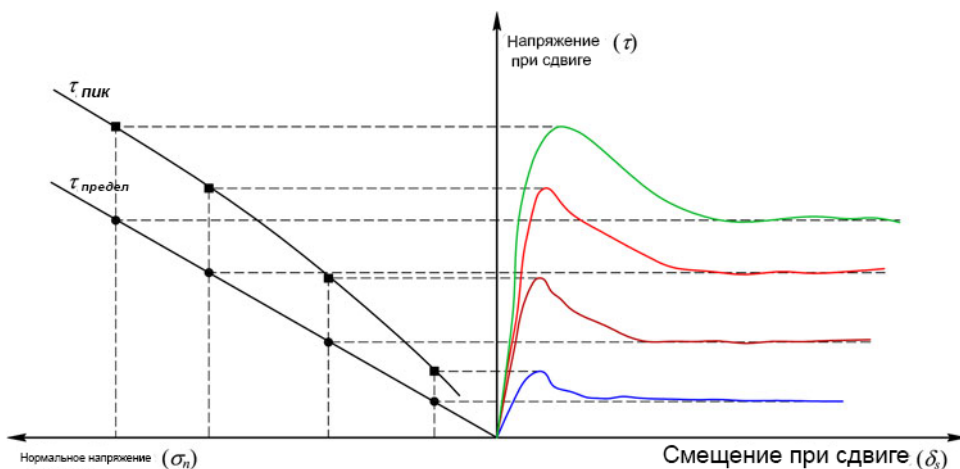
6.1 Данные

(а) Проверьте отдельные записи данных, чтобы убедиться в согласованности всех измерений.

(б) Если номинальные напряжения не предоставлены непосредственно системой сбора данных, рассчитайте нормальные напряжения и напряжения сдвига следующим образом:

$$\sigma_n = \frac{N}{A}, \quad (1)$$

Рис. 6 Оценка пиковых и предельных или остаточных напряжений при сдвиге



$$\tau = \frac{T}{A}, \tag{2}$$

где N нормальная нагрузка, T нагрузка при сдвиге, A номинальная площадь σ_n нормальное напряжение, τ напряжение при сдвиге.

(c) Как указано в Разд. 4.2(f), если номинальная площадь уменьшается при сдвиге, это необходимо учитывать при расчете номинальных напряжений.

(d) Рассчитайте нормальные и сдвиговые перемещения, если они не предоставляются непосредственно системой сбора данных.

6.2 Графики и Вычисления

(a) Для определения сопротивления сдвигу образца соединения (Рис. 5) необходимы следующие графики:

- i. Графики зависимости напряжения сдвига от сдвигового смещения;
- ii. Графики зависимости нормального смещения от сдвигового смещения;
- iii. Графики зависимости нормальной нагрузки от сдвига, в случае испытаний ПНЖ.

(b) Также могут быть представлены графики зависимости нормальной нагрузки от нормального смещения для этапов приложения нормальной нагрузки.

(c) Используя записи данных и графики зависимости напряжения при сдвиге от сдвигового смещения, оцените пиковые и предельные или остаточные напряжения при сдвиге для каждого образца одного и того же соединения горных пород или горизонта испытаний в случае одноэтапных испытаний или для всех этапов многоэтапных испытаний одного и того же образца горных пород (Рис. 6) (Виттке 1990).

(d) Используя записи данных и графики зависимости нормального смещения от сдвигового смещения, оцените пиковые и предельные или остаточные углы расширения для каждого образца

одного и того же соединения пород или горизонта испытаний в случае одноэтапных испытаний или для всех стадий многоэтапных испытаний одного и того же образца породы.

(e) Построить графики, изображающие зависимости пикового напряжения сдвига от нормального напряжения и предельного или остаточного напряжения сдвига от нормального напряжения.

(f) Используйте эти графики для оценки прочностных параметров предписанного критерия разрушения. Критерии Мора-Кулона обычно подходят для адекватного моделирования результатов испытаний скальных соединений на сдвиг. В этом случае параметры этого линейного критерия разрушения определяются следующим образом:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \tag{3}$$

где c это сила сцепления фракций грунта, $\tan \phi$ коэффициент трения, ϕ угол трения.

(e) Следует проявлять особую осторожность при использовании параметров прочности по критерию Мора-Кулона. Результаты не следует экстраполировать за пределы диапазона приложенных нормальных напряжений во время испытаний, особенно при низких значениях σ_n как показано на Рис. 6.

(f) В случае шероховатых или неплоских соединений нелинейная огибающая прочности при сдвиге может быть более представительной для результатов испытаний. В этих случаях можно рассмотреть другие хорошо известные критерии разрушения, рассчитать соответствующие параметры и представить их также как результаты испытаний. К таким критериям относятся: значение i Паттона (Бартон 1976) или JRC Бартона и Чоуби (1977). Последний также позволяет решить проблему влияния размера выборки (Бандис и др. 1981).

(e) Следует проявлять особую осторожность при использовании параметров прочности по критерию Мора-Кулона. Результаты не следует экстраполировать за пределы диапазона приложенных нормальных напряжений во время испытаний, особенно при низких значениях σ_n , как показано на Рис. 6.

(f) В случае шероховатых или неплоских соединений нелинейная огибающая прочности при сдвиге может быть более представительной для результатов испытаний. В этих случаях можно рассмотреть другие хорошо известные критерии разрушения, рассчитать соответствующие параметры и представить их также как результаты испытаний. К таким критериям относятся: значение i Паттона (Бартон 1976) или JRC Бартона и Чоуби (1977). Последний также позволяет решить проблему влияния размера выборки (Бандис и др. 1981).

(g) В случае многоступенчатых испытаний видимая когезия может быть преувеличена из-за накопления повреждений при последовательном сдвиге одного и того же образца соединения.

(h) Поскольку доступны измерения сдвига и нормального смещения, параметры деформации, такие как нормальная и сдвиговая жесткость образцов, также могут быть получены из испытаний.

7 Представление Результатов

(a) Отчет должен включать следующее:

i. Описание образцов для испытаний, включая:

- идентификация всех проб и образцов;
- даты отбора проб и испытаний;
- общее количество образцов для испытаний;
- размеры образцов, включая номинальную площадь поперечного сечения;

- источник каждого образца, включая название проекта, местоположение и глубину, номер и наклон буровой скважины;

- геологическое описание каждого образца, включая описание неповрежденной породы, поверхности сдвига (например, шероховатость, отверстие);

- ориентация образцов и испытательных горизонтов (направление падения и наклона), включая относительный угол между направлением падения и направлением сдвига, или, в случае образцов из скважины, угол между образцами и осью скважины;

- фотографии образцов до и после испытаний.

ii. Набор графиков, включая сравнительные графики напряжения и смещения при сдвиге, графики зависимости нормального смещения от сдвига и графики зависимости нормальной нагрузки от сдвига в случае испытаний ПНЖ. Также могут быть добавлены графики зависимости нормального напряжения от нормального смещения, изображающие нормальное приложение нагрузки.

iii. Графики и табличные значения пикового и предельного или остаточного напряжения сдвига в зависимости от нормального напряжения, пикового и предельного или остаточного углов расширения, а также расчетные значения параметров прочности при сдвиге.

(b) В отчет также могут быть включены следующие пункты. При отсутствии то они должны быть доступны по запросу.

i. Схема и описание испытательного оборудования и описание методов, использованных для отбора, упаковки, транспортировки, хранения, монтажа и испытания образцов. Допускается ссылка на данный Предложенный Метод ISRM с указанием только отклонений от предписанных процедур.

ii. Подробная информация о любых специальных измерительных устройствах, используемых для измерения шероховатости, номинальной площади или других характеристик образца. Например, необходимо указать название, тип, разрешающую способность и точность любого бесконтактного устройства для измерения поверхности.

iii. Таблицы данных со всеми значениями, необходимыми для построения графиков, представленных в отчете.

Приложение: Терминология

Апертура - расстояние между стенками разрыва, измеренное перпендикулярно средней плоскости разрыва.
Жесткость при сдвиге - отношение напряжения при сдвиге к соответствующему сдвигу до достижения пика прочности при сдвиге.

Испытательная система с замкнутым контуром - испытательная система, в которой истинная реакция нагружающего привода (приводов) постоянно сравнивается с желаемой реакцией нагружающего привода (т.е. контур обратной связи) и при необходимости корректируется.

Кажущееся напряжение - номинальное напряжение на поверхности разрыва, которое представляет собой внешнюю нормальную или сдвиговую нагрузку, приложенную к разрыву на номинальную единицу площади.

Керн - угловое вращение вокруг оси, параллельной направлению сдвига.

Коэффициент трения - отношение приложенного напряжения сдвига к соответствующему видимому нормальному напряжению, что эквивалентно отношению приложенной нагрузки сдвига к соответствующей нормальной нагрузке.

i. *Пиковый коэффициент трения* (μ_{peak}) - отношение пикового напряжения сдвига к соответствующему видимому нормальному напряжению, которое эквивалентно арктангенсу отношения пиковой нагрузки сдвига к соответствующей нормальной нагрузке.

ii. *Коэф. предельного трения* (μ_{ult}) отношение предельной прочности на сдвиг к соответствующему видимому нормальному напряжению, которое эквивалентно арктангенсу отношения предельной нагрузки на сдвиг к соответствующей нормальной нагрузке.

iii. *Коэф. остаточного трения* (μ_{res}) равен коэф. остаточного трения, если аппарат способен достичь достаточно большого сдвига.

Неровность - любая неравномерность или отклонение поверхности по отношению к средней плоскости разрыва. Неровности и отклонения могут варьироваться от острых или угловатых до гладких или округлых.

Неровности - совокупность неровностей поверхности, составляющих шероховатость поверхности разрыва.

Номинальная площадь - (A) площадь, полученная путем измерения или расчета площади поперечного сечения проекции поверхности несплошности на плоскость сдвига.

Нормальное смещение - (δ_n) относительное смещение половинок соединения перпендикулярно плоскости сдвига.

Пиковая нагрузка на сдвиг - (T_{peak}) наибольшая зарегистрированная нагрузка на сдвиг, соответствующая начальной нормальной нагрузке, после чего нагрузка на сдвиг уменьшается до достижения предельной или остаточной нагрузки на сдвиг.

Пиковая прочность при сдвиге - (τ_{peak}) наибольшее зарегистрированное напряжение при сдвиге, соответствующее определенному начальному видимому нормальному напряжению, после которого нагрузка при сдвиге уменьшается до достижения предельной или остаточной нагрузки при сдвиге.

Постоянная Нормальная Нагрузка - (ПНН) методология испытания на прямой сдвиг, при которой приложенная нормальная нагрузка поддерживается постоянной в течение всего испытания, а нормальная жесткость может изменяться.

Постоянная Нормальная Жесткость - (ПНЖ) методика испытания на прямой сдвиг, при которой приложенная нормальная жесткость поддерживается постоянной в течение всего испытания, а приложенная нормальная нагрузка изменяется.

Предельная нагрузка на сдвиг - (T_{ult}) нагрузка на сдвиг, соответствующая определенной начальной нормальной нагрузке, при которой нагрузка на сдвиг остается практически постоянной при увеличении сдвига.

Предельная прочность при сдвиге - (τ_{ult}) напряжение сдвига, соответствующее определенному начальному видимому нормальному напряжению, для которого напряжение сдвига остается практически постоянным при увеличении сдвига.

Разрыв - любое механическое нарушение целостности или физических свойств породы, например, плоскости залегания, разломы, расщепление, трещины, швы или разломы. Виды разрывов могут быть описаны как:

i. **плотные (закрытые)** (т.е. состоящие из противоположных поверхностей породы, находящихся в тесном и в целом непрерывном контакте);

ii. **разрывные (открытые)** (т.е. состоящие из противоположных поверхностей пород, разделенных открытым пространством);

iii. **частично или полностью закрытый** (т.е. состоящий из противоположных поверхностей пород, разделенных пространством, которое частично или полностью закрыто любым типом закрывающего материала, например, глиной, выделениями, брекчией, милолитом, тонкими покрытиями или прожилками); и далее характеризуются в зависимости от их геометрии как:

iv. **плоскостные и не плоскостные (волнистые)** (т.е. уровень отклонения от средней плоскости разрыва).

v. **Хорошо согласованные или плохо согласованные** (т.е. степень сцепления между двумя стенками разрыва).

Рысканье - угловой поворот вокруг оси, перпендикулярной направлению сдвига и плоскости сдвига.

Система испытаний с разомкнутым контуром - система испытаний, в которой желаемая реакция на нагружение подается на вход привода нагружения без обратной связи с фактической реакцией для облегчения коррекции.

Смещение при сдвиге - (δ_s) относительное смещение половинок шарнира, измеренное вдоль направления сдвигающей нагрузки.

Тангаж - угловой поворот вокруг оси, перпендикулярной направлению сдвига и параллельной плоскости сдвига.

Остаточная нагрузка на сдвиг (T_{res}) равна остаточной нагрузке на сдвиг, если аппарат способен достичь достаточно большого сдвига. **Остаточная прочность при сдвиге** - (τ_{res}) равна остаточной прочности при сдвиге, если аппарат способен достичь достаточно большого сдвига.

Угол дилатации - арктангенс отношения нормального смещения к соответствующему сдвиговому смещению

i. **Угол пикового расширения** (i_{peak}) арктангенс отношения нормального смещения при пиковой прочности на сдвиг к соответствующему сдвиговому смещению.

ii. **Угол предельного расширения** (i_{ult}) арктангенс отношения нормального смещения при предельной прочности на сдвиг к соответствующему сдвиговому смещению.

iii. **Угол остаточного расширения** (i_{res}) арктангенс

отношения нормального смещения при остаточной прочности при сдвиге к соответствующему смещению при сдвиге (Обратите внимание, что обычно трудно достичь истинной остаточной прочности из-за ограниченного смещения при сдвиге, поэтому следует использовать термин "предельная прочность").

Угол трения - коэффициент отношения приложенного напряжения сдвига к соответствующему видимому нормальному напряжению (σ_n), который эквивалентен коэффициенту отношения приложенной нагрузки сдвига к соответствующей нормальной нагрузке.

i. **Пиковый угол трения** (ϕ_{peak}) арктангенс отношения пикового напряжения сдвига к соответствующему видимому нормальному напряжению, что эквивалентно арктангенсу отношения пиковой нагрузки сдвига к соответствующей нормальной нагрузке.

ii. **Предельный угол трения** (ϕ_{ult}) арктангенс отношения предельной прочности на сдвиг к соответствующему видимому нормальному напряжению, что эквивалентно арктангенсу отношения предельной нагрузки на сдвиг к соответствующей нормальной нагрузке.

iii. **Остаточный угол трения** (ϕ_{res}) равен остаточному углу трения, если аппарат способен достичь достаточно большого сдвига.

Шероховатость - мера присущей поверхности разрыва неровности и волнистости относительно средней плоскости.

Список Литературы

- Алонсо ЕЕ, Пиньол НМ, Пинеда ЖА (2011) Основание гравитационной плотины на слоистых мягких породах. Прочность на сдвиг плоскостей подстилающего слоя в лабораторных и крупных испытаниях "на месте". In: Анагностопулос А и др. (ред.) Proc. 15th Европейская конф. Механика грунтов и инженерная геотехника, Афины, Греция, IOS Press, Амстердам.
- ASTM (2008) Стандартный метод испытаний для проведения лабораторных прямых испытаний на прочность при сдвиге образцов горных пород.
- Стандартный метод испытаний для проведения лабораторных испытаний образцов горных пород на прочность при сдвиге под действием постоянной нормальной силы. ASTM International, West Conshohocken, p 12
- Айдан О⁺, Шимизу Й, Кавамото Т (1992) Анизотропия морфологических характеристик поверхности разрывов горных пород. Rock Mech Rock Eng 29(1):47-59
- Bandis S, Lumsden AC, Barton N (1981) Экспериментальные исследования влияния масштаба на поведение скальных соединений при сдвиге. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 18(1):1-21
- Барла Г., Барла М., Мартинонни М.Е. (2010) Разработка нового аппарата для прямого аппарата для испытаний на сдвиг. Rock Mech Rock Eng 43:117-122
- Барла Г., Роботти Ф., Вай Л. (2011) Пересмотр испытаний на прямой сдвиг фундаментов из скального массива большого размера. In: Pina C, Портела Е, Гомес J (ред.), 6-я Международная конференция по строительству плотин, Лиссабон, Португалия. LNEC, Лиссабон
- Бартон Н (1976) Прочность на сдвиг скальных пород и скальных соединений. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 13(9):255-279

- Бартон Н, Чоуби В (1977) Прочность на сдвиг соединений горных пород в теории и практика. *Rock Mech Rock Eng* 10:1-54
- Блюмель М, Поэтш М (2003) Система испытаний на прямой сдвиг. Геотехнические Измерения и моделирование. In: Natau O, Fecker E, Pimentel E. (eds), Karlsruhe, Germany, Swets and Zeitlinger, Lisse, pp 327-332
- Блюмель М, Баттон Е.А., Поэтш М (2003) Поведение породы при сдвиге под контролем жесткости. 10-й конгресс ISRM, Технологическая дорожная карта для механики горных пород. Йоханнесбург, Южная Африка. Южноафриканский институт горного дела и металлургии, Йоханнесбург, том 1, стр. 121-124.
- Булон М (1995) Трехмерное устройство прямого сдвига для тестирования механического поведения и гидравлической проводимости стыков горных пород. In: Second Int. Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock MJFR-2, Vienna, Balkema, Rotterdam, pp 407-413.
- Хриссантакис П (2004) Исследование участка в Оскарсхамне. Буровая скважина KSH01A. Испытания на нормальное напряжение и сдвиг соединений. Отчет СКБ № Р-04-185. СКБ, Стокгольм, стр. 38
- Грасселли Г (2001) Прочность на сдвиг соединений горных пород на основе квантованного описания поверхности. Докторская диссертация. Политехническая школа Лозанны.
- Хэнкер СР, Ричардс ЛР (1982) Основное сопротивление трению в швов в гонконгском граните. Гонконгский инженер, стр. 21-25
- Индрадатна Б, Хаке А, Азиз Н (1999) Поведение при сдвиге идеализированных швов с наплавкой при постоянной нормальной жесткости. *Geotechnique* 49(3):331-355
- ISRM (2007) Полный перечень предлагаемых ISRM методов для определения характеристик, испытаний и мониторинга горных пород.
- определения характеристик, испытаний и мониторинга горных пород: 1974-2006. In: Улусай Р. Хадсон Дж. А. (ред.), Предлагаемые методы, подготовленные Комиссией по методам испытаний, ISRM, сборник организован Турецкой национальной группой ISRM, Козан Офсет, Анкара.
- JGS (2008) Метод прямого испытания на сдвиг скальных разрывов. Японское геотехническое общество, Токио, стр. 8
- Джанг Й, Сяо Й, Танабаши Й, Мизоками Т (2004) Разработка автоматизированного аппарата прямого сдвига с сервоуправлением, применяющего условие постоянной нормальной жесткости. *Int J Rock Mech Min Sci* 41(2):275-286
- Джонсон И., Лам Т. (1989) Поведение при сдвиге регулярных треугольных бетон/скала - анализ. *J Geotec Engng* 115(5):711-727
- Лейхниц В (1985) Механические свойства соединений горных пород. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 22(5):313-321
- Муралья Х (2007) Пути напряжения в лабораторных испытаниях на сдвиг стыков горных пород. In: Рибейро Соуса Л, Олалла С, Гроссманн Н (ред.), 11-й конгресс ISRM Вторая половина века механики горных пород, Лиссабон, Португалия, Taylor & Francis, Лондон, том 1, стр. 431-434.
- Прист СД (1993) Анализ прерывистости для проектирования горных пород, 1-е изд. Чапман и Холл, Лондон
- Стимпсон Б, Меткалф РГ, Уолтон Г (1970) Новая техника для уплотнения и упаковки образцов горных пород и почвы. *Q J Eng Geol* 3:127-133
- Татоне БСА, Грасселли Г (2009) Метод оценки трехмерной шероховатости поверхностей разрушения в хрупких геоматериалах. *Rev Sci Instrum* 80:125110-125119
- USACE (1980) Метод испытания на прочность при прямом сдвиге образцов керна горных пород. Инженерный корпус армии США, Виксбург, стр. 9.
- Виттке В (1990) Механика горных пород: теория и приложения с примерами из практики. Шпрингер-Верлаг, Берлин