# НЕДРЕНИРОВАННАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗЖИЖЕНИЕ ПЕСКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

UNDRAINED DEFORMATION AND LIQUEFACTION OF SAND UNDER THE ACTION OF CYCLIC LOADS

**УДК 69.04**

**Соколов Николай Сергеевич,** кандидат технических наук, доцент Заведующий «Кафедрой строительных технологий, геотехники и экономики строительства» Строительный факультет ФГБОУ ВО «ЧувГУ им. И.Н.Ульянова» Россия, г. Чебоксары

**Анисимов Роман Борисович,** Студент магистратуры 2 курс, Строительный факультет ФГБОУ ВО «ЧувГУ им. И.Н.Ульянова», Россия, г. Чебоксары

**Sokolov Nikolai Sergeevich,** far21rus@gmail.com

**Anisimov Roman Borisovich** far21rus@gmail.com

## Аннотация

Здесь вводятся пять основ, на которых должна строиться модель недренированного деформирования песка при циклическом нагружении. Процедуры для оценки порового давления, деформации сдвига и последующего возникновения ожижения во время циклического нагружения проиллюстрированы на диаграммах. Характеристики недренированного песка, предсказанные предложенной моделью, сравнивались с результатами нескольких циклических трехосных испытаний, проведенных в различных условиях. К ним относятся тесты с контролем напряжения и деформации, статические и динамические испытания. Тесты проходили циклически с постоянной и

неравномерно изменяющейся амплитудой напряжения. Сравнение показало актуальность и применимость этого подхода.

**Annotation.** Here, five foundations are introduced on which a model of undrained sand deformation under cyclic loading should be built. The procedures for evaluating pore pressure, shear strain and subsequent fluidization during cyclic loading are illustrated in the diagrams. The undrained sand characteristics predicted by the proposed model were compared with the results of several cyclic triaxial tests carried out under different conditions. These include stress and strain control tests, static and dynamic tests. The tests were carried out cyclically with a constant and non-uniformly varying voltage amplitude. The comparison showed the relevance and applicability of this approach.

**Ключевые слова.** дилатансия, разжижение, повторная нагрузка, песок, испытание на трехосное сжатие.

**Keywords.** dilatancy, liquefaction, repeated load, sand, triaxial compression test.

Повышение осведомленности об опасности, вызванной разжижением песчаного грунта, вызвало необходимость исследования механизма, в котором потеря прочности реализуется в результате прогрессивного развития порового давления в насыщенных песках. Этот аспект проблемы позволил сформулировать закон увеличения порового давления при циклических напряжениях, исходя из предположения, что остаточное поровое давление в каждом цикле одинаково до начала действия разжижения. Анализируя пути эффективных напряжений, можно предположить, что разжижение происходит в тот момент, когда эффективные напряжения удовлетворяют критерию разрушения, заданному истинным углом внутреннего трения песка. Испытания на трехосный сдвиг выявили четыре важных аспекта, которые считаются наиболее фундаментальными при работе с деформациями песка: закон дилатансии, закон деформации сдвига, условие текучести и анизотропия текучести. В результате этих исследований было обнаружено, что с добавлением еще одного постулата, определяющего условия

начала разжижения, вышеупомянутые исследования могут быть интегрированы в модель, с помощью которой поровое давление, разжижение, а также отношения напряжения и деформации могут быть описаны в единую модель. Целью данной статьи является представить этот аспект исследования.

Все испытания проводились с использованием аппарата для испытания на трехосный сдвиг с образцами диаметром 5 см и высотой 10 см. Физические свойства песков для статических и динамических испытаний показаны в таблице 1.

Таблица 1

| | $D_{10}$ (mm) | G* | $e_{max}$ | $e_{min}$ | Uc** |
|---|---|---|---|---|---|
| Стат. исп. | 0,22 | 2,68 | 1,08 | 0,53 | 2,21 |
| Дин. исп. | 0,13 | 2,67 | 0,99 | 0,55 | 2,34 |

*Удельный вес

**Коэффициент однородности

Неплотные образцы получают путем заливки песка ложкой в форму, заполненную деаэрированной водой. Плотное состояние упаковки достигалось механической вибрацией и утрамбовкой. В качестве параметров напряжения используются среднее эффективное главное напряжение, $p' = (\sigma_a' + 2\sigma_r')/3$, и напряжение сдвига, $q = \sigma_a' - \sigma_r'$, где $\sigma_a'$ и $\sigma_r'$ - осевые и радиальные эффективные напряжения, соответственно. Деформация сдвига $r$ определяется выражением $\varepsilon_a - \varepsilon_r$, а изменение объема $V$ выражением $(\varepsilon_a - 2\varepsilon_r)/3$, где $\varepsilon_a$ и $\varepsilon_r$ - осевая и радиальная деформации соответственно. $r$ определяется как положительный, когда образец укорачивается по длине.

Типичное поведение песка в недренированном испытании на трехосное сжатие показано на рис. 1. Сыпучий образец, имеющий коэффициент пустотности 0,749 был подвергнут нескольким циклам разгрузки и перегрузки, прежде чем подвергся чрезмерному срезанию. И деформация сдвига, и эффективная траектория напряжения указывают на то, что процесс перегрузки проходит по тому же пути, что и разгрузка, если соотношение напряжений поддерживается

ниже определенного предела. Когда мы ограничиваем наше внимание поведением ниже этого предела, известно, что всякий раз, когда происходит пластическая текучесть, эффективное напряжение снижается и возникает остаточное поровое давление. Следовательно, если поровое давление должно возникать на любой стадии циклической деформации, оно всегда должно быть связано с возникновением деформации, которая носит пластический характер. Именно на основе этой точки зрения предпринято следующее представление о механизме развития динамического порового давления.

Посредством утрамбовки или вибрации песок может быть доведен до любого желаемого состояния упаковки от максимальной до минимальной плотности. Когда образец, уплотненный до любой из этих плотностей, подвергается напряжениям, он проявляет пластическую текучесть с самого начала нагружения, и поэтому каждое из начальных состояний, имеющих различные плотности, можно рассматривать как определяющее исходное состояние. Таким образом, в песке могло существовать бесконечное количество исходных состояний. Теперь приготовьте образец, имеющий одну из этих начальных плотностей, и подвергните его системе напряжений, состоящей из эффективного среднего главного напряжения $p'$ и напряжения сдвига $q$. Затем произойдут некоторые изменения плотности или пустотности образца $e$. Если эти изменения нанесены на график в пространстве, имеющем $p'$, $q$ и $e$ в качестве координат, можно построить вектор, который определяет путь состояния в пространстве $p'$-$q$-$e$. Теперь приготовьте несколько образцов с заданной начальной плотностью, которые были сжаты при заданном значении $p'$. Выполните набор испытаний на трехосный сдвиг на всех образцах в этом состоянии, используя различные пути состояний. Повторите тот же набор трехосных испытаний на образцах, приготовленных теперь при различных значениях $p'$, но с той же начальной плотностью.

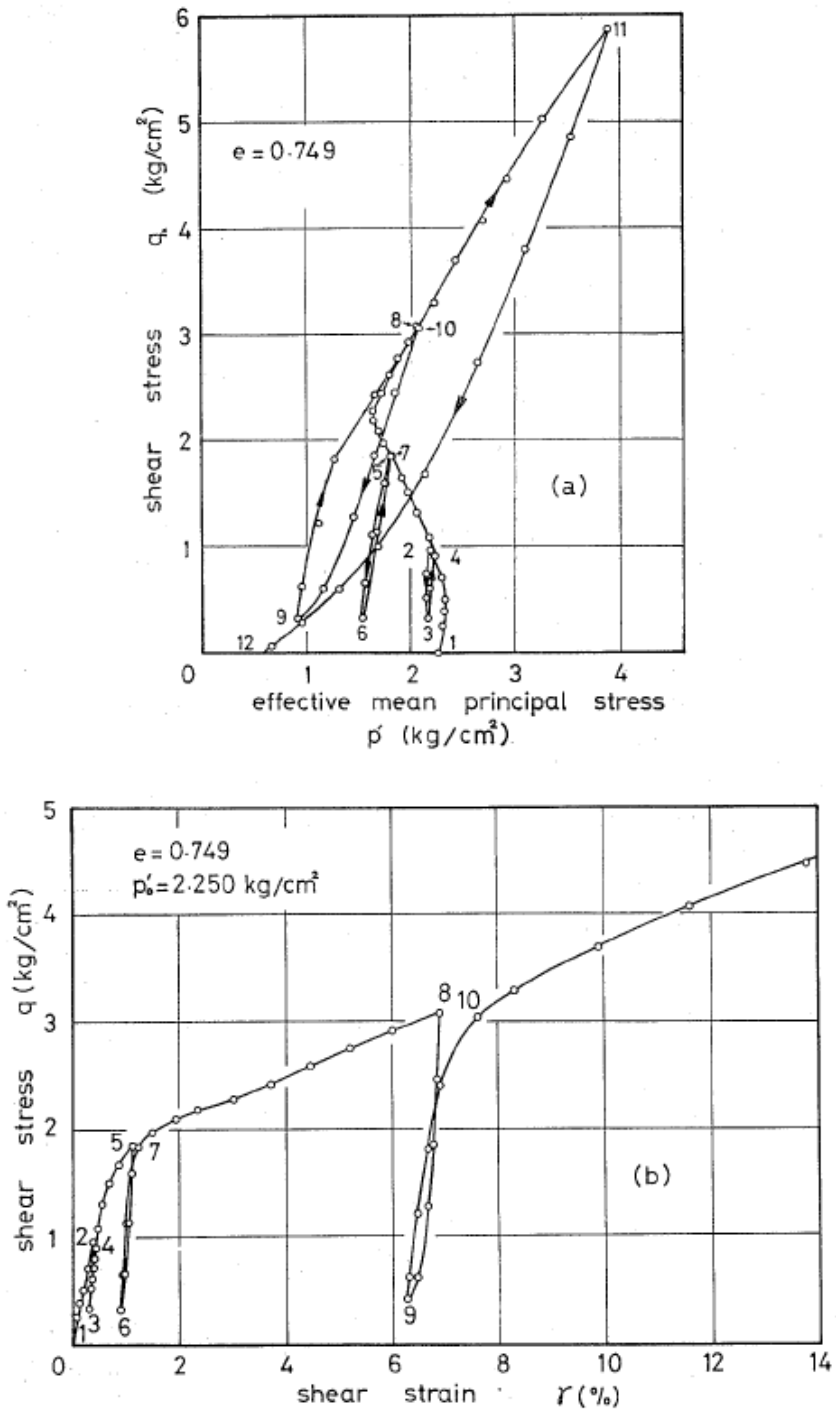


Рис. 1. Циклическое недренированное испытание на сыпучем образце с переменной амплитудой отношения напряжений.

Затем у нас есть несколько искривленных векторов в пространстве *p′-q-e*, которые поднимаются из точек, лежащих на кривой сжатия в плоскости *p′-e*. Эти изогнутые векторы, определяющие пути состояний, обычно не лежат на одной общей поверхности в *p′-q-e* пространстве. Однако, если другая кривая на плоскости *p′-e*, называемая базовой линией, правильно выбрана в

непосредственной близости от кривой сжатия, и, если вышеупомянутые изогнутые векторы немного изменены так, что они поднимаются от базовой линии, поверхность может быть определена в *p'-q-e* пространство такое, что все искривленные векторы, определяющие пути состояний, лежат на этой поверхности. Построенная таким образом поверхность состояний может существовать для каждого 'из заданных начальных состояний упаковки песка и, следовательно, существует бесконечное количество таких поверхностей, стратифицированных в *p'-q-e* пространстве. Очень важно напомнить, что поверхность состояния задает маршрут движения в *p'-q-e* пространстве, вдоль которого должны изменяться напряжения, чтобы деформация была пластичной. Пластическая податливость в песке может происходить только тогда, когда напряжения изменяются на путях, лежащих на поверхности состояния, а все другие пути вдали от нее связаны просто с упругими деформациями. В случае испытаний без дренажа, в которых изменение объема запрещено, траектории состояний, вдоль которых должны изменяться напряжения, представляют собой искривленные участки, образованные пересечением $e = const$ с поверхностью состояния. На рис. 2 показаны семейства траекторий состояний (или траекторий напряжений), полученные таким образом как в результате трехосного сжатия, так и растяжения незакрепленных образцов. Обратите внимание, что существует множество путей состояний для данного коэффициента пустот из-за множественности поверхности состояний. Полученные выше траектории недренированных напряжений основаны на концепции поверхности состояния, но для практических целей они могут быть получены путем проведения серии трехосных недренированных испытаний с различными начальными ограничивающими давлениями. На рис. 2 также показаны траектории разгрузочных напряжений, обусловленные упругим восстановлением у деформации.

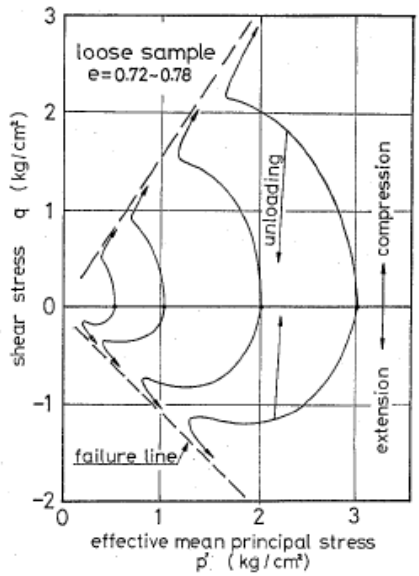


Рис. 2. Типичная недренированная траектория напряжений для рыхлых образцов

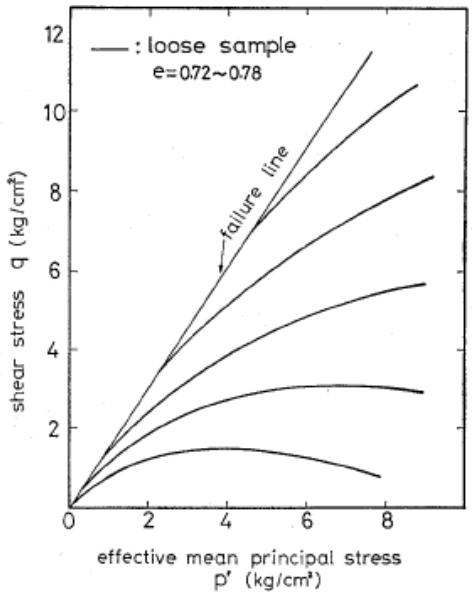


Рис. 3. Выход сыпучих образцов.

Когда напряжения изменяются во время циклического нагружения с нерегулярной амплитудой, крайне необходимо иметь критерии, по которым на любой стадии данной истории напряжений можно решить, является ли текущая деформация пластической или просто упругой. Были проведены некоторые исследования для определения семейств локусов текучести для различных плотностей песка. Результаты испытаний, проведенных исключительно в области трехосного сжатия, показали, что для любой заданной плотности песка в *p'-q* пространстве могут быть однозначно определены независимо от истории напряжений, которым ранее подвергался образец. На рис. 3 видно, что для эффективных средних главных напряжений ниже примерно 2 кг / см2 точки текучести представляют собой почти прямые линии, расходящиеся наружу от начала координат. Приближение в этом отношении будет удобно использовать в следующем разделе. Места текучести интерпретируются как кривая, на которой начинается текучесть всякий раз, когда в ней изменяются напряжения, и поэтому, когда напряжения изменяются на нижней стороне текущего эффективного местоположения, соответствующая деформация является упругой.

Несколько серий испытаний на трехосное сжатие и растяжение, в которых образцы песка подвергались сложным последовательностям изменений

напряжений, показали, что деформации сдвига, возникающие при пластической текучести, являются функцией только текущего состояния напряжений и плотности и определяются независимо от истории напряжений в образце. Было также показано, что, если те точки в $p'$-$q$ пространстве, которые дают одинаковую деформацию сдвига, связаны вместе, мы можем определить то, что можно назвать равными линиями. На рис. 4 с точками данных показаны типичные примеры уравновешенных или сыпучих образцов песка, полученные в результате нескольких испытаний, в которых использовались различные траектории напряжений.

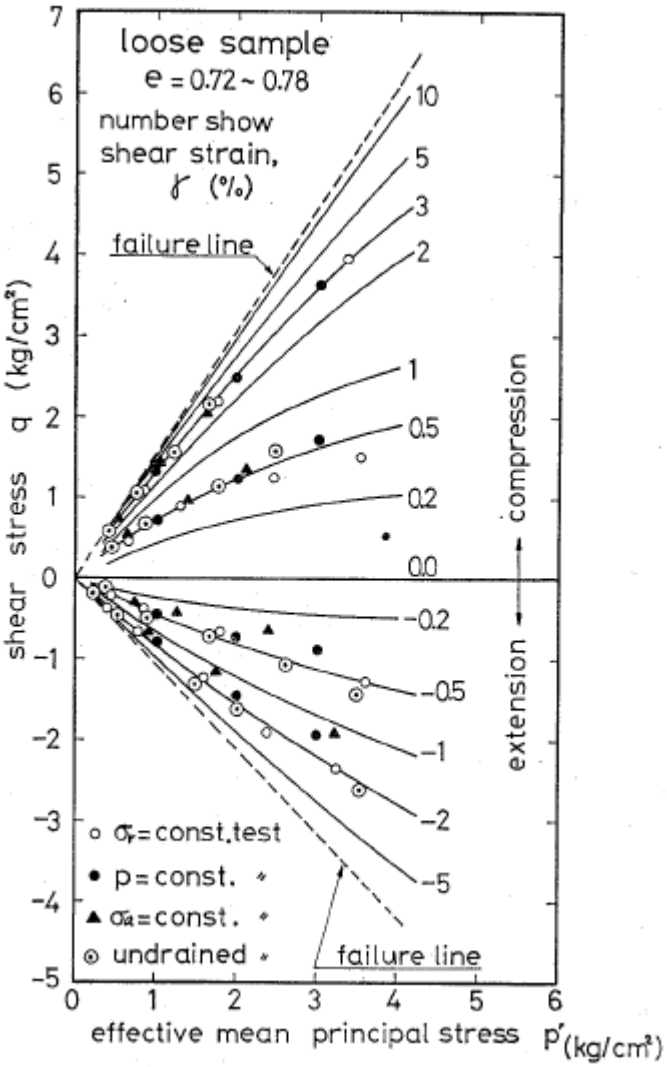


Рис. 4. Линии для образцов

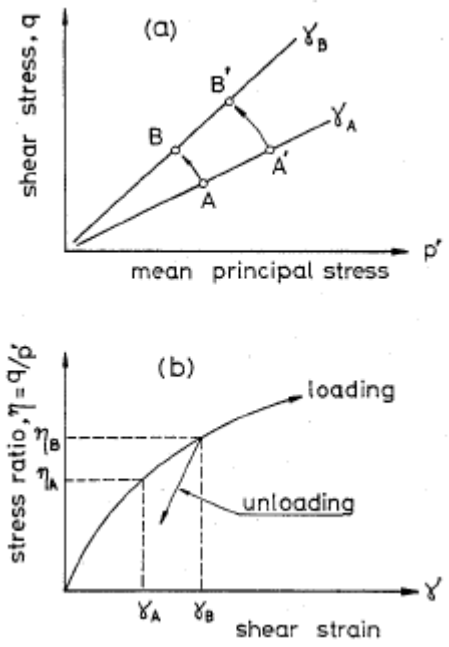


Рис. 5. Значения линий.

Линии, показанные на рис. 4, предполагают, что они могут быть аппроксимированы с хорошей точностью набором прямых, расходящихся наружу

от начала координат в $p'$-$q$ пространстве. Это приближение помогает значительно упростить процедуру. Когда этот тип контурных линий становится доступным, становится легкой задачей оценить деформации сдвига на любой стадии сложной временной истории изменения напряжения. На рис. 5 показаны схематические изображения, иллюстрирующие процедуры. Две смежные равные линии, на которых должны создаваться деформации сдвига $r_A$ и $r_B$, показаны на рис. 5 (a). Следует напомнить, что согласно определению линий, деформация сдвига, возникающая при изменении напряжений из точки A в точку B по произвольной траектории, должна быть равна деформации сдвига, которая возникает во время изменения напряжения. от A' до B'. Это означает, что деформация сдвига в образце данной плотности является функцией отношения напряжений $q / p'$ отдельно и не зависит от $p'$. Следовательно, график в пространстве $p'$-$q$ может быть преобразован в отношение отношения напряжений к деформации сдвига, как показано на рис. 5 (b), на котором также указана кривая упругого отскока в результате разгрузки. Используя эти два вида диаграмм взаимозаменяемо, можно оценить деформации сдвига во время циклического нагружения.

В серии испытаний с трехосным дренажом, в которых образцы песка подвергались трехосному сдвигу при сжатии после небольшого цикла изменения напряжения при трехосном растяжении, было продемонстрировано, что характеристики деформации при трехосном сжатии были почти такими же, как и характеристики деформации при трехосном сжатии. которые были бы обнаружены в образцах, если бы они не были подвергнуты предыдущему циклу растяжения. Перефразируя, память о предыдущей истории напряжений, пережитых во время цикла с низкой амплитудой при растяжении, не появляется, и образец показывает податливость с самого начала нагрузки при трехосном сжатии, как если бы она находилась в исходном состоянии. Подобное поведение также наблюдалось при испытаниях на трехосное растяжение, которые проводились после того, как образцы подверглись небольшому циклу трехосного сжатия. Также в случае недренированных испытаний было показано, что текущее

поведение песка во время деформирования в одном прямом ионе не изменяется в какой-либо значительной степени из-за того, что предыдущий цикл был применен в другом направлении. Таким образом, можно упомянуть, что текущие характеристики деформации по мере того, как исходный образец не стирается, независимо от того, является ли образец рыхлым или плотным, даже после того, как он выдержал некоторую историю напряжений в противоположном направлении, поскольку его амплитуда сохранялась в определенных пределах.

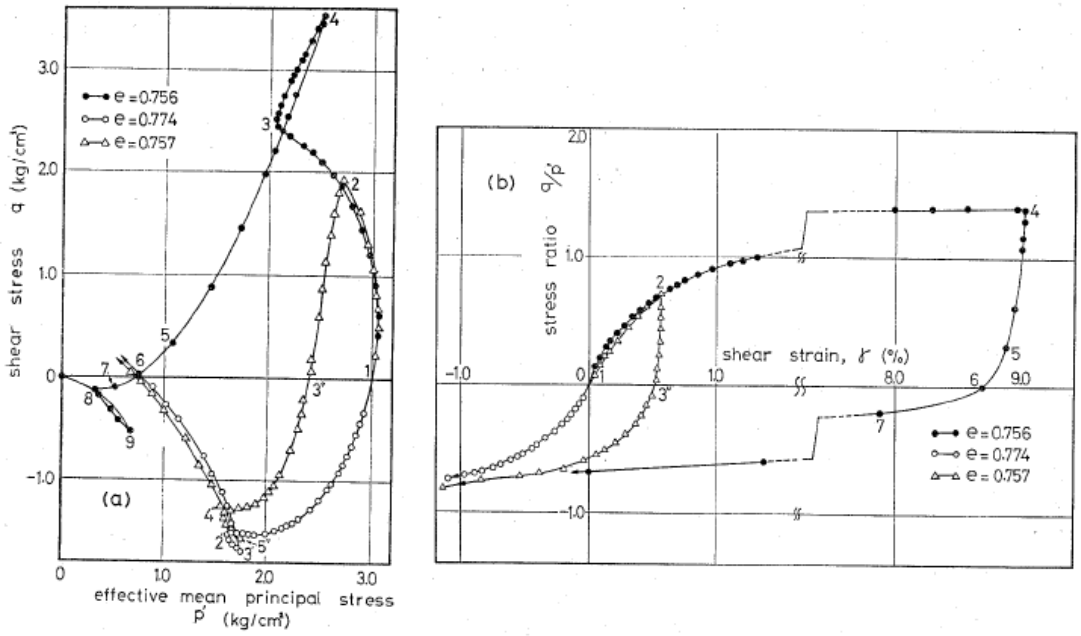


Рис. 6 Результаты испытаний, иллюстрирующие начальное состояние разжижения

Эффективный путь напряжения в циклическом недренированном трехосном испытании на сжатие, показанный на рис.1 (a), показывает, что, когда коэффициент напряжений повышается до большого значения, появляется очень необычное поведение: величина порового давления, которое возникает в ответ на последующее разгрузка становится неожиданно большой, что приводит к нестабильности образца. Чтобы более внимательно изучить этот аспект, было проведено несколько дополнительных испытаний, результаты которых показаны на рис. 6. В одном из испытаний на трехосное сжатие приложение напряжения сдвига заставляет путь напряжения сначала двигаться против часовой стрелки, как показано на рис. Рис. 6 (a), но позже в точке 3 согнуть в направлении пути с постоянным отношением $q / p'$. После снятия напряжения сдвига в точке 4 образец

имеет тенденцию развивать значительное поровое давление, но гораздо более радикально, как только образец приводится в состояние трехосного растяжения. В соответствии с этим деформации сдвига ведут себя, как показано точками 4–5–7 на рис. 6 (b). · Подобные тенденции также отмечаются в недренированном тракте при испытании на трехосное удлинение, как показано точками 1, 2', 3’, 6 на рис. 6. На рис. 6 также показан недренированный путь напряжения для еще одного испытания, в котором трехосное сжатие прекращается на полпути в точке 2 и приводится в растяжение. В этом случае образец не создает заметного порового давления. Интересно отметить на рис. 6, что возникновение в образцах избыточных поровых давлений во время разгрузки в значительной степени зависит от максимального напряжения сдвига, из которого снимаются напряжения. Осторожный. Наблюдение за рис. 6, а также с рис. 1, по-видимому, предполагает, что существует некоторое пороговое значение в соотношении напряжений, при котором снятие напряжения участвует просто в обычно определяемом упругом отскоке, но при превышении, которого при снятии нагрузок возникает избыточное поровое давление. Внимательное изучение ряда имеющихся тестовых данных вместе с результатами на рис. 1 и 6 показали, что отношение напряжений, соответствующее точке, в которой траектории напряжений меняют свое направление в пространстве $p'$-$q$, можно логически выбрать в качестве порога, разделяющего два различных поведения, которые будут проявляться в последующем процессе разгрузки и нагружения в другое направление. Как объяснялось ранее, удаление

нагрузки от отношений напряжений ниже этого порога приведут только к упругому восстановлению, и даже если отношение напряжений снова превысит ранее приложенное, деформация останется по типу пластического наклепа. Следовательно, если соотношение напряжений не превышает пороговое значение, можно сказать, что деформация, возникающая в ходе любой истории напряжений, будь то простые или сложные циклы, может иметь тип пластического деформационного упрочнения, тем самым сохраняя характеристики твердого

тела. И наоборот, как только отношение напряжений больше, чем это, применяется к образцу, избыточные поровые давления развиваются во время последующей разгрузки и нагружения в другом направлении, и, если приложение циклического напряжения будет продолжаться и дальше, эффективное ограничивающее давление станет равным нулю, в результате чего образец до сжиженного состояния. Хотя превышение порогового отношения напряжений не всегда приводит к полному разжижению, необходимо, чтобы образец прошел хотя бы один раз через это критическое значение, чтобы перейти в полностью разжиженное состояние. В том смысле, как описано выше, критическое отношение напряжений можно рассматривать как порог, при котором поведение песка как твердого вещества теряется и превращается в разжиженное состояние. По этой причине угол, определяемый пороговым значением, можно назвать углом фазового преобразования. В следующей презентации это

Предполагается, что разжижение может происходить, когда коэффициент напряжений становится больше, чем значение, соответствующее углу фазового превращения. В случае рыхлых образцов из речного песка Фудзи угол трансформации, как показано на рис. l (a) и 6 (a) дают отношения напряжений 1,30 для трехосного сжатия и -0.91 для продления. Эти значения немного меньше по величине, чем отношения напряжений, соответствующие линиям разрушения, т.е. 55 при трехосном сжатии и -1.05 в трехосном удлинении.

Основные характеристики, упомянутые выше, позволяют создать модель деформации для насыщенного песка, подверженного циклическим напряжениям в недренированных условиях. Таким образом, с помощью этой модели можно последовательно проследить, как поровое давление нарастает со временем и когда может происходить разжижение в ходе циклов нагрузки, изменяющихся с нерегулярной амплитудой. Фундаментальные постулаты, на которых основана модель, можно перечислить следующим образом.

Характеристики порового давления (постулат 1)

Всякий раз, когда у образца есть тенденция вызывать безвозвратное изменение объема, наложение недренированного состояния реагирует так, что возникает остаточное поровое давление. Поровые давления, которые развиваются в каждом цикле после превышения ранее приложенных напряжений, определяются траекторией недренированных напряжений, как показано на рис. 2, которые получены из состояния поверхности. когда эффективное ограничивающее давление снижается после каждого цикла с сопутствующим увеличением остаточного порового давления, предполагается, что происходит переключение с рассматриваемой в данный момент поверхности состояния на поверхность, лежащую в соседнем окружении, и, следовательно, путь недренированного напряжения, который необходимо соблюдать в Непосредственно последующий цикл представлен другим путем напряжения, расположенным внутри рядом с текущим. Упругое восстановление эффективных напряжений при разгрузке и перегрузке определяется траекторией напряжения, определенной в экспериментах в недренированных условиях. На основании результатов испытаний предполагается, что все пути разгрузки идентичны как при трехосном сжатии, так и при растяжении.

Характеристики деформации сдвига (постулат 2)

Недренированные циклические нагрузки заставляют траекторию напряжения в плоскости $e = const$ перемещаться таким образом, что вектор напряжения последовательно проходит через равные r-линии, тем самым создавая пластические деформации сдвига. Предполагается, что линии можно аппроксимировать прямыми, проходящими через начало координат в p '-q пространстве. Предполагается, что при уменьшении эффективного среднего главного напряжения, p ', переключение в основном происходит от отношения деформации сдвига отношения текущих напряжений к деформации, соответствующей соседнему состоянию упаковки, но разницей из-за этого можно практически пренебречь, поскольку связанный. изменение коэффициента пустотности, если оно существует, очень мало. Следовательно, для всех

состояний, которые должны быть реализованы с точки зрения уменьшения p ', отношение отношения напряжений к деформации сдвига будет считаться идентичным. Именно на основе этого предположения, что эквивалентные линии, показанные на рис. 4, могут иметь практическое значение. Предполагается, что упругие деформации сдвига, возникающие при разгрузке и повторной нагрузке, подчиняются одному и тому же правилу как трехосному сжатию, так и растяжению.

Условие текучести (постулат 3)

Предполагается, что точки текучести могут быть аппроксимированы с достаточной точностью, независимо от плотности песка, семейством прямых линий, расходящихся наружу от начала координат.

Направленная независимость условий текучести (постулат 4)

Пока напряжения изменяются либо в пределах диапазона трехосного сжатия, либо растяжения, происходит ли деформация или нет, можно судить по условию текучести, упомянутому выше. В случаях, когда во временную историю изменений напряжения включены как трехосное сжатие, так и растяжение, необходимы другие критерии. Затем предполагается, что условие текучести при трехосном сжатии или растяжении не зависит от истории напряжений, которые образец ранее выдерживал в противоположном диапазоне напряжений.

Состояние начала разжижения (постулат 5)

Выше было показано, что нестабильность насыщенного песка возникает, когда отношение эффективных напряжений $q / p'$ становится равным тангенсу угла фазового превращения. Следовательно, предполагается, что нарастание порового давления во время циклического нагружения будет продолжаться до тех пор, пока эффективное соотношение напряжений не коснется угла фазового превращения, после чего начнется разжижение.

На основе пяти основных постулатов, упомянутых выше, можно полностью проследить траекторию движения напряжений и, следовательно, оценить способ, которым поровые давления и деформации сдвига развиваются в образце, когда он

подвергается циклическим напряжениям с нерегулярными амплитудами. Процедуры для этого проиллюстрированы набором диаграмм на рис. 7. Предположим, что образец консолидирован до эффективного среднего главного напряжения, обозначенного точкой 1 на рис. 7 (Ь), а затем заданной последовательности сдвига. изменения напряжения, показанные на рис. 7 (a), приложены к образцу. В ответ на начальное увеличение напряжения сдвига эффективная траектория напряжения проходит от точки 1 до 2 на рис. 7 (b). вдоль девственной кривой, известной из постулата 1. Разгрузка и перезагрузка из точек со 2 по 4 не приводит к безвозвратному изменению порового давления, поскольку события в этом процессе полностью эластичны. Начиная снова с точки 4, траектория напряжения повторяет исходную кривую до точки 5, тем самым создавая постоянное изменение порового давления. Разгрузка от точки 5 до 6 включает только упругое событие, траектория напряжения которого определяется по кривой упругого отскока. Как только траектория напряжения попадает в область трехосного растяжения, образец снова начинает демонстрировать пластическую деформацию в соответствии с Постулатом 4, предусматривающим независимость от направления условия текучести. Те части траектории напряжения, которые обозначены точками 7, 8, 9, 10, 11, связаны с упругими деформациями, потому что в этом процессе траектория напряжения не может пройти через какой-либо новый локус текучести. Пластическая деформация возобновляется, когда траектория напряжения снова проходит вдоль девственной кривой от точки 11 на стороне растяжения. Путь разгрузки от точки 12 до 13 вызывает только упругие деформации, а также путь перегрузки в области трехосного сжатия, начиная с точки 13. В точке 14 отношение напряжений $q / p'$ становится равным таковому в точке 5, т.е. е., снова достигается максимальное отношение напряжений, которое когда-либо испытывал образец. Так как новые места текучести, не подвергавшиеся обработке, теперь протоптаны до достижения точки напряжения 15, пластическая текучесть имеет место в соответствии с Постулатом 3 на всем пути от точки 14, направляемый другой исходной

траекторией напряжения, относящейся к поверхности состояния, смежной с ранее упомянутой. Разгрузка и последующая перезагрузка из точки напряжения с 15 по 17 являются просто упругим явлением. В точке 17 превышается ранее приложенное отношение напряжений, и, следовательно, наступает пластическая деформация, которая продолжается до тех пор, пока, наконец, не будет достигнуто состояние напряжения, обозначенное точкой 18, где отношение напряжений совпадает с линией фазового превращения. В этот момент происходит разжижение в соответствии с Постулатом 5. Последующее нагружение может привести к тому, что путь напряжения будет идти примерно так, как показано на Рис. 7 (b), но следует отметить, что могут возникнуть значительные трудности, когда кто-то пытается найти путь после разжижения. Эта задача выходит за рамки настоящего исследования. Вышеупомянутая процедура позволяет описать полную карту траектории напряжения, как показано на рис. 7 (b), и с помощью этой диаграммы теперь можно узнать историю отношения напряжений $q / p'$ во времени, как показано на рис. 7 (c). Поскольку зависимость между отношением напряжений и деформацией сдвига для пластической и упругой частей деформации уже известна, пять основных постулатов, как установлено выше, также позволяют составить полную картину относительно соотношения напряжений и деформации сдвига. Это представлено на рис. 7 (d). Физические последствия каждой ветви кривых точно такие же, как и для соответствующей части траектории напряжения, указанной на рис. 7 (b). Следует отметить, что деформации сдвига после того, как отношение напряжений превышает угол фазового превращения, бесконечно велики.

Если значения деформации сдвига считываются с рис. 7 (f) и наносятся на график в зависимости от времени, мы получаем историю изменений деформации во времени, как показано на рис. 7 (e). Эта диаграмма вместе с приведенной. временная история изменений напряжения на фиг. 7 (a), позволяет составить полную картину зависимости напряжения от деформации, как показано на рис. 7 (f).

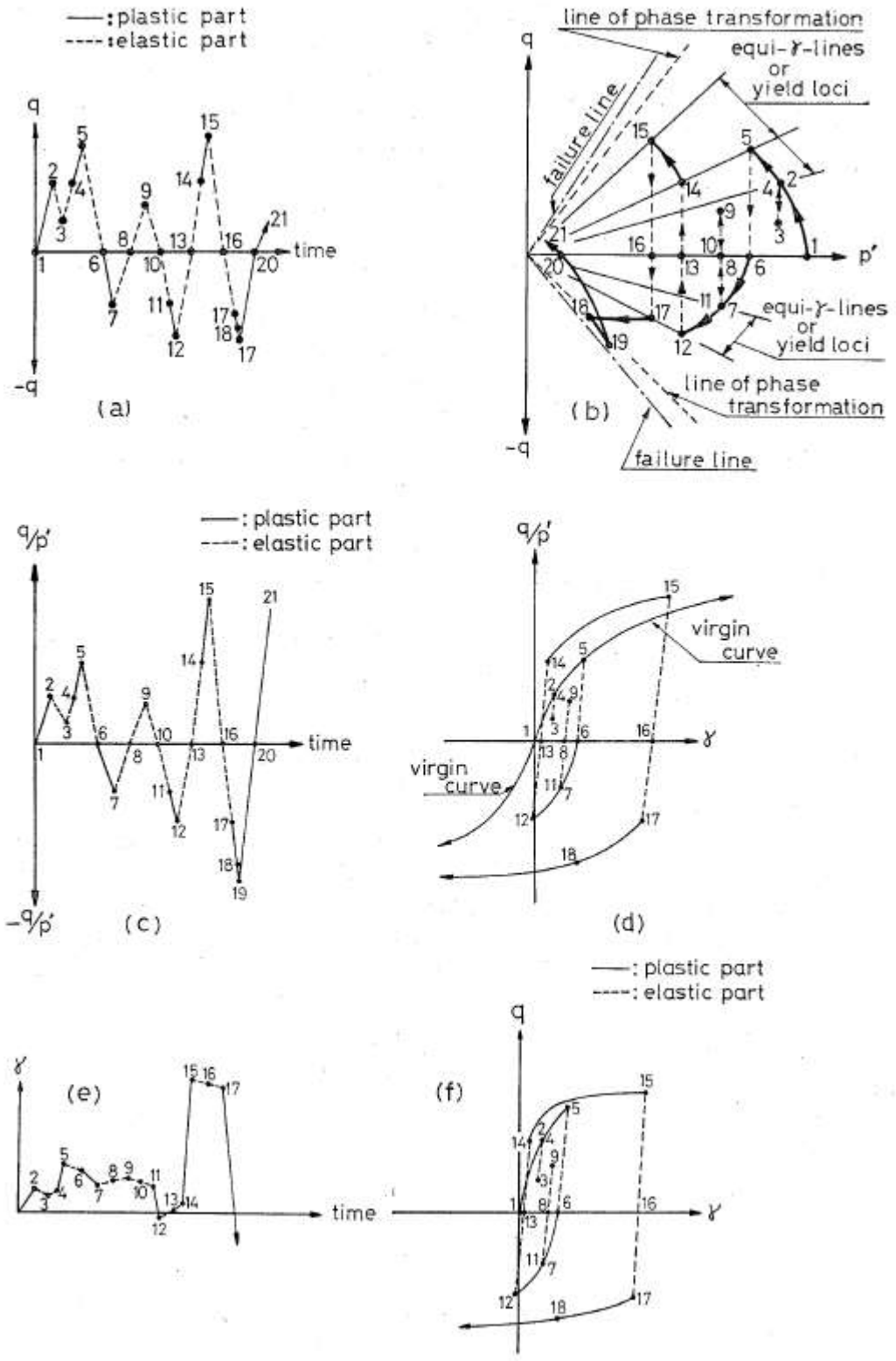


Рис. 7 Графики, иллюстрирующие графическое представление модели недренированного деформирования при циклических напряжениях

Модель деформации, установленная выше, будет применяться для оценки характеристик, которые будет проявлять песок при различных типах нагрузки. Сравнивая прогнозируемое поведение с фактически наблюдаемым, будет изучена актуальность и применимость модели.

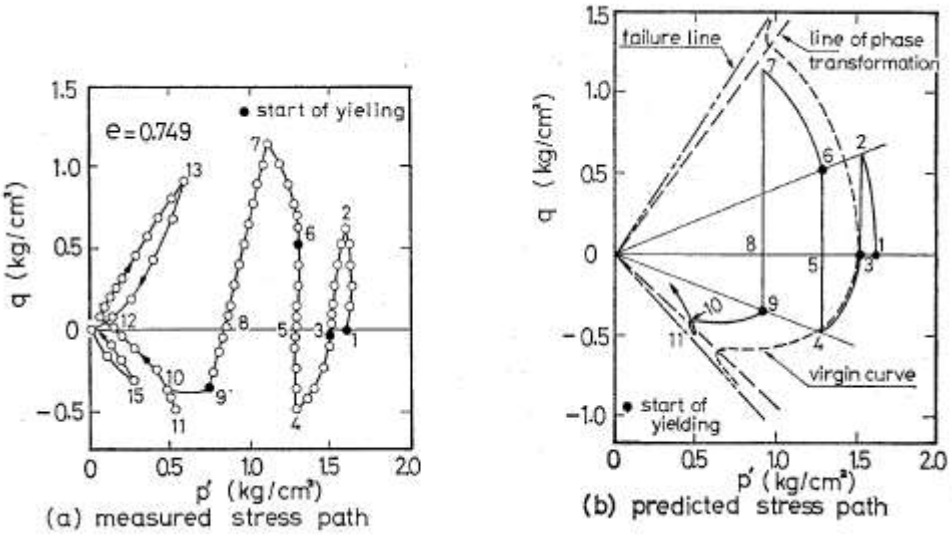


Рис. 8 Сравнение измеренных и прогнозируемых недренированных: траектории напряжений в статических испытаниях с контролируемым напряжением циклически изменяются с нерегулярной амплитудой

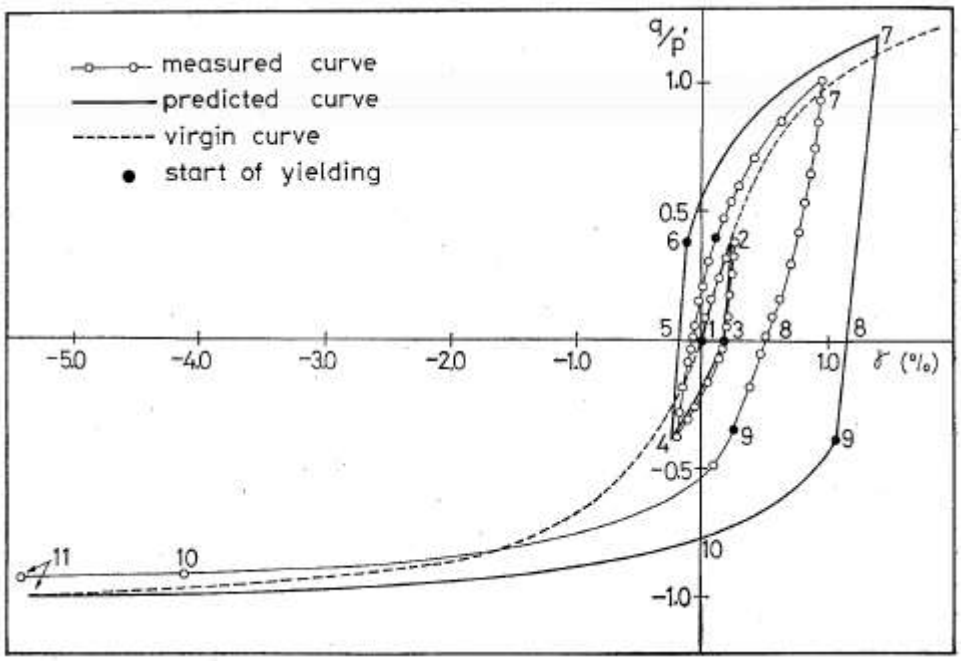


Рис. 9 Сравнение измеренных и прогнозируемых деформаций сдвига в статических испытаниях с регулируемым напряжением, циклически повторяемых с нерегулярной амплитудой

Статические циклы с нерегулярной амплитудой, контролируемые напряжением

Сыпучий образец с паросодержанием 0.749 были консолидированы до $p' = 1.595$ кг/см$^2$ и подвергнуты последовательности беспорядочных изменений трехосного напряжения сдвига. Результаты испытаний представлены на рис. 8 (a) и 9. Отношение напряжений становится равным углу фазового превращения в точке 10 на стороне трехосного растяжения, вследствие чего индуцируется разжижение. С другой стороны, траектория напряжений и отношение отношения напряжений к деформации сдвига были оценены с помощью предложенной модели с использованием основных данных, представленных на рис. 2 и 4, а результаты показаны на рис. 8 (b) и 9. Хотя кажется хорошее совпадение между прогнозируемыми и наблюдаемыми характеристиками, некоторые различия в деталях, похоже, существуют.

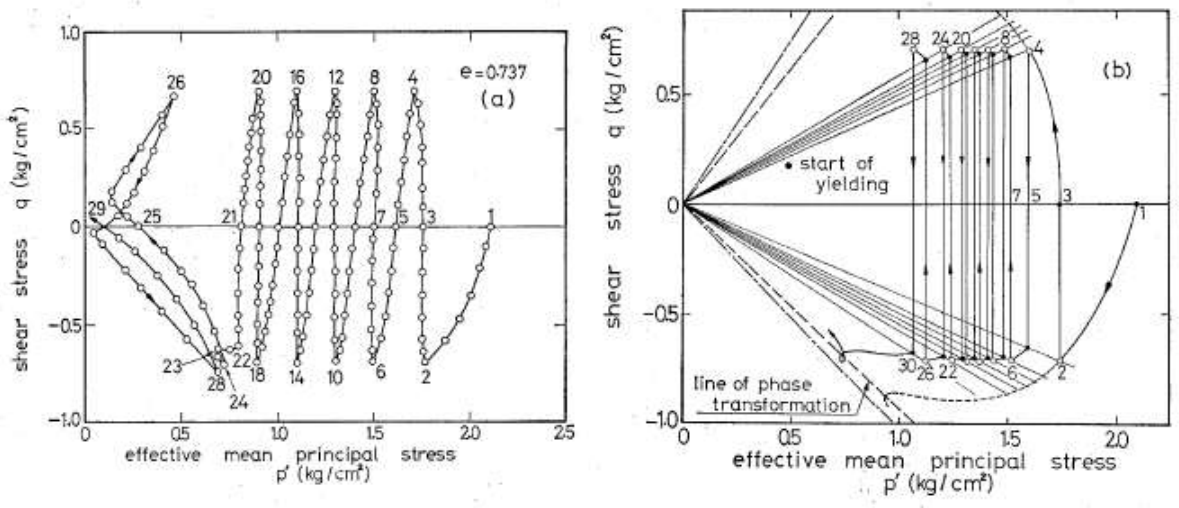


Рис. 10 Сравнение измеренных и прогнозируемых траекторий недренированных напряжений в статических испытаниях с контролируемым напряжением с постоянной амплитудой.

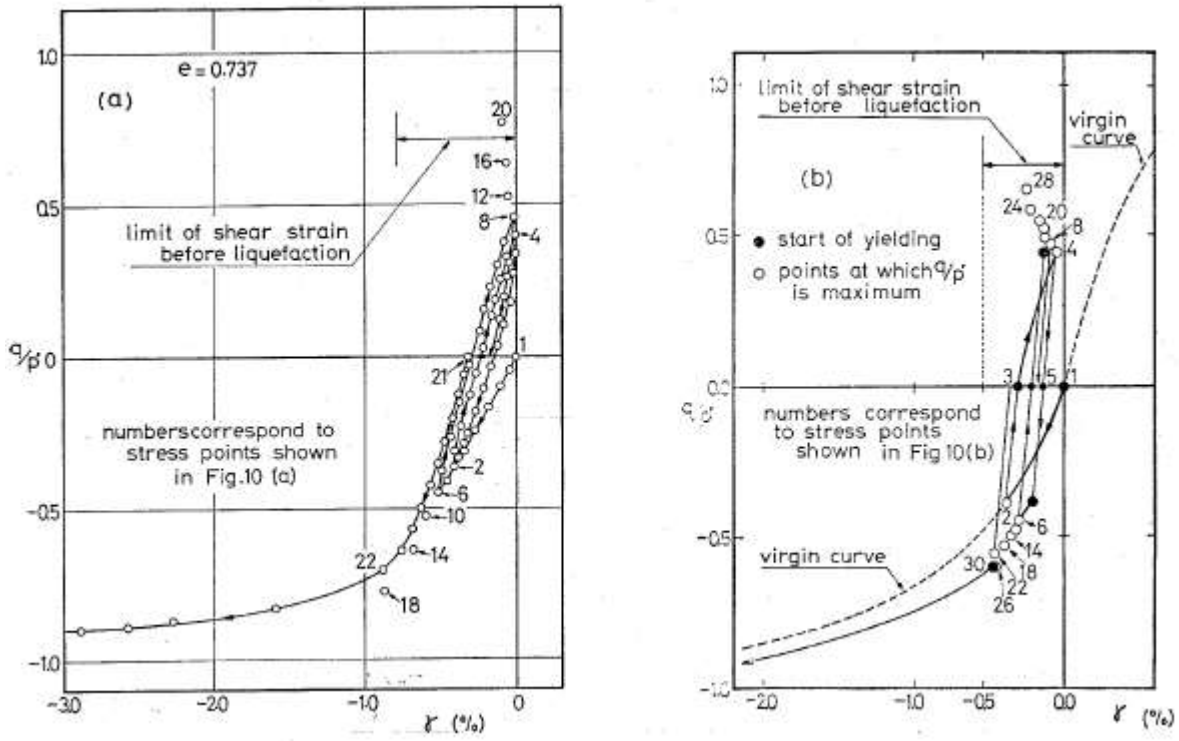


Рис. 11 Сравнение измеренных и прогнозируемых деформаций сдвига в статических испытаниях с контролируемым напряжением с постоянной амплитудой.

Отметим, однако, что что касается остаточного порового давления в пределах каждого цикла, согласие кажется удовлетворительным.

Статические циклы с постоянным напряжением и постоянной амплитудой

Рис. 10 (а) и 11 (а) показаны результаты испытания на трехосный сдвиг на свободном образце с паросодержанием 0,737. После того, как поровое давление нарастает примерно с постоянной скоростью, происходит разжижение в точке напряжения 23, где отношение напряжений становится равным углу фазового превращения. Прогнозируемые характеристики с помощью модели с использованием основных данных на рис. 2 и 4 показаны на рис. 10 (б) и 11 (Ь). Что касается траектории напряжения, согласование не обязательно хорошее, поскольку в этом случае траектория напряжения должна много раз проходить через участок, на который кривизна исходных кривых оказывает очень тонкое влияние. Это, однако, не может недооценивать пригодность предложенной модели, потому что чем более случайным образом изменяются напряжения, как это обычно бывает, тем лучше согласованность проявляется в вышеприведенном

примере. График зависимости отношения напряжений от деформации на рис. 11 показывает, что деформации (или, что эквивалентно, модуль деформации) в каждом цикле остаются почти неизменными до начала разжижения, хотя модуль, по-видимому, должен уменьшаться из-за последовательного уменьшения эффективного ограничивающего давления. Это противоречие может быть разрешено, если принять во внимание тот факт, что пластические деформации примерно одинаковой величины, но с разным знаком попеременно возникают в пределах каждого цикла. Этим можно объяснить обычное наблюдение, что разжижение происходит довольно резко и до тех пор деформация массы грунта очень мала и почти незаметна.

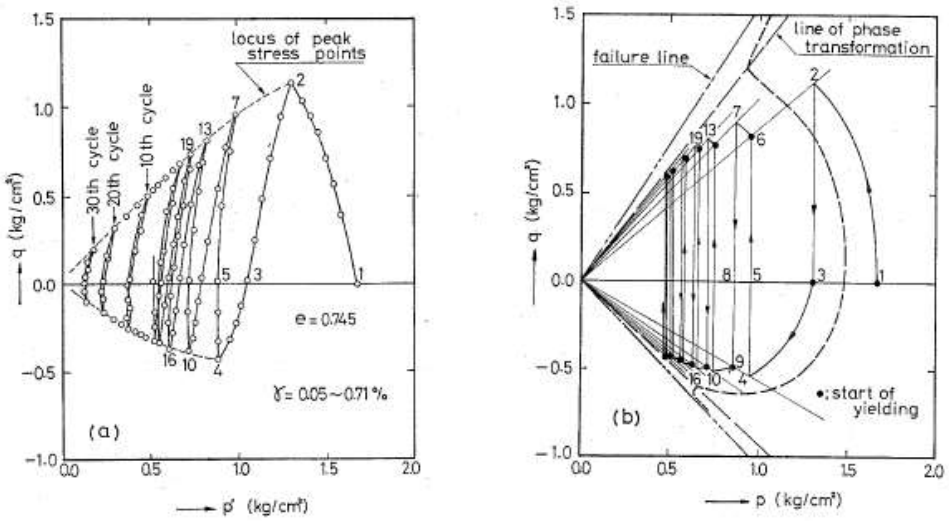


Рис. 12 Сравнение измеренных и прогнозируемых недренированных траекторий в статических испытаниях с контролем деформации с постоянной амплитудой

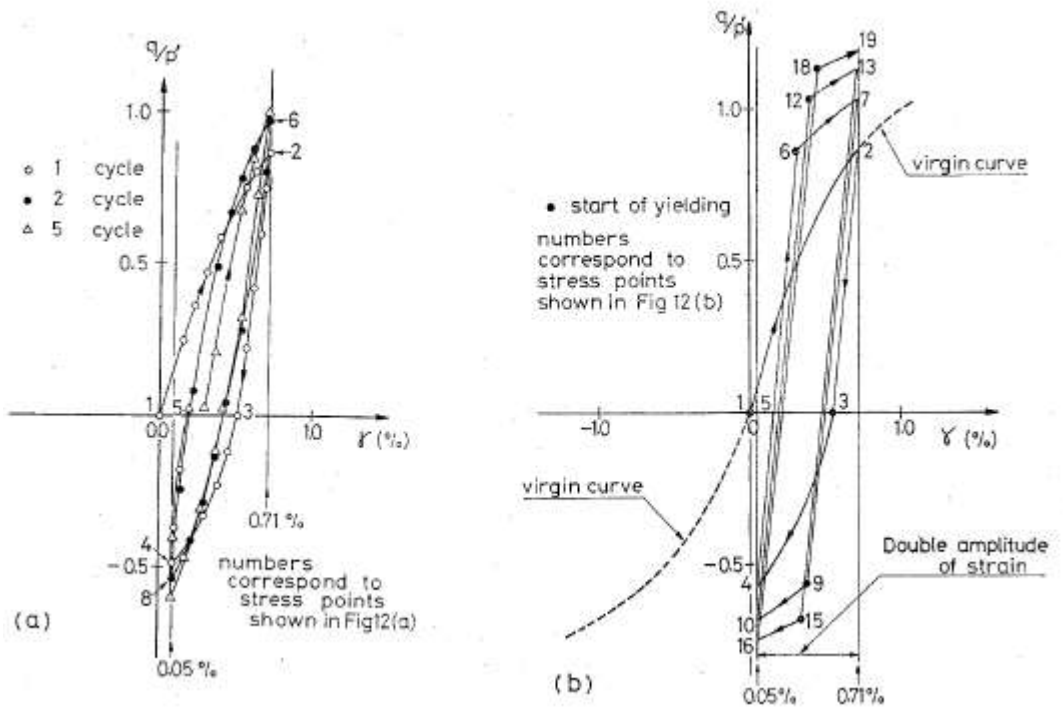


Рис. 13 Сравнение измеренных и прогнозируемых деформаций сдвига в статических испытаниях с контролируемой деформацией, повторяемых с постоянной амплитудой

Статические циклы с постоянным напряжением и постоянной амплитудой.

Поровое давление и отношение отношения напряжений к деформации, которые, как ожидается, будут развиваться в условиях нагружения с контролируемой деформацией, также можно оценить с помощью процедур, представленных в предыдущем разделе. На этот раз заданная последовательность изменений деформации сначала отображается в зависимости от времени, как это было сделано на рис. 7 (e). Затем с помощью основных кривых кромок и упругих кривых, показанных на рис. 4, можно построить диаграмму гистерезиса между отношением напряжений и деформацией таким же образом, как показано на рис. 7 (d). Эта процедура дает временную историю отношения напряжений, как показано на рис. 7 (c). Затем, с помощью основных траекторий напряжений, представленных на рис. 2, известная временная история отношения напряжений может быть помещена в карту траекторий напряжений, как показано на рис. 7 (b). Рис. 12 и 13 демонстрируют прогнозируемые характеристики рыхлого образца, подвергнутого циклам с постоянной амплитудой деформации, варьирующейся от

0,05 до 0,71%. С другой стороны, испытание на трехосный сдвиг с контролируемой деформацией было проведено в тех же условиях, и результаты представлены на рис. 12 (а) и 13 (а). Можно с уверенностью сказать, что предсказание с помощью модели удовлетворительно воспроизводит реальные характеристики. В статье, посвященной циклическим испытаниям с дренажом, было продемонстрировано, что в случае испытаний с контролем деформации с постоянной амплитудой напряжение сдвига увеличивается с циклами. В отличие от этого, циклические недренированные испытания: при прочих равных условиях дают постепенное уменьшение амплитуды напряжения сдвига по мере продолжения цикла. Это, казалось бы, противоречивое поведение можно хорошо объяснить с помощью предложенной модели.

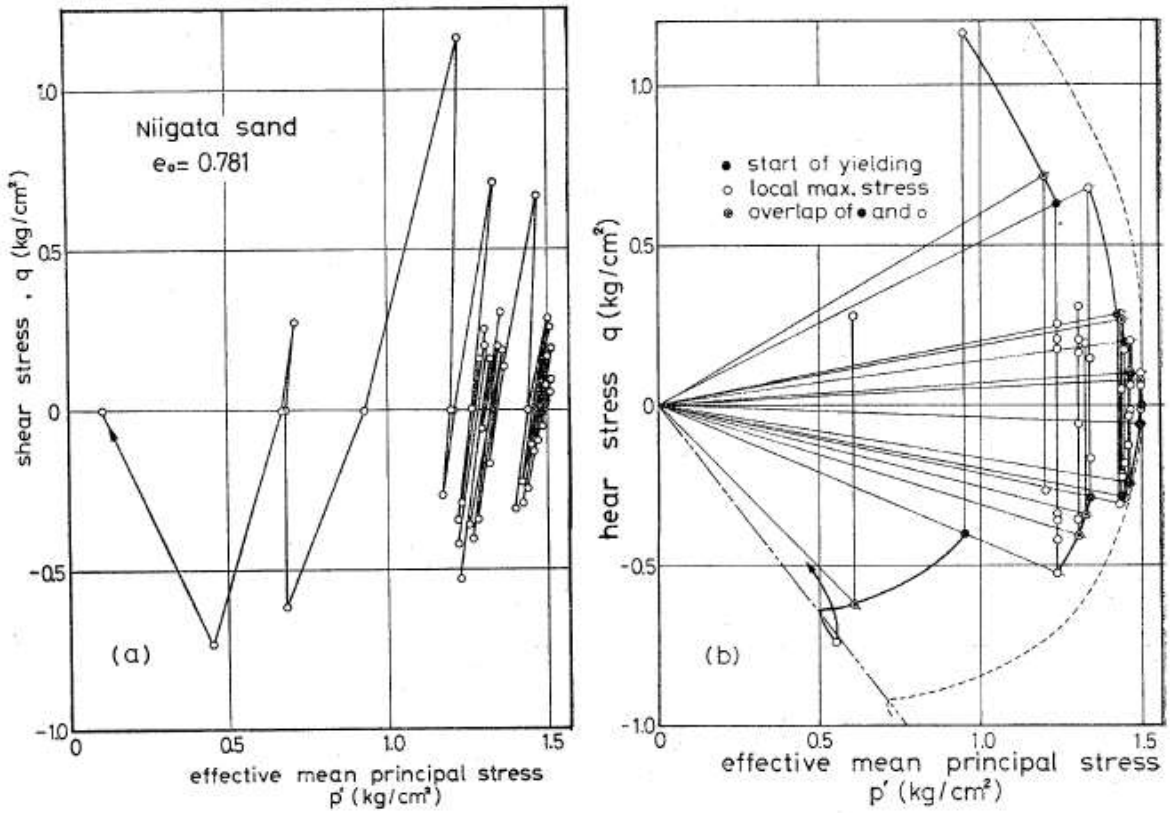


Рис. 14 Сравнение измеренных и прогнозируемых недренированных траекторий в динамических испытаниях с регулируемым напряжением, циклически повторяемых с нерегулярной амплитудой

Управляемые напряжением динамические циклы с нерегулярной амплитудой

С помощью сервогидравлической системы нагружения с замкнутым контуром были проведены динамические трехосные испытания на рыхлых

образцах песка. По измеренному изменению порового давления были построены диаграммы пути эффективного напряжения. На рис. 14 (a) показан путь напряжения, полученный таким образом в испытании, в котором максимальное напряжение сдвига приходилось на сторону трехосного сжатия. С другой стороны, прогнозируемые траектории напряжений с использованием предложенной модели и эффективные траектории напряжений, полученные в результате статических испытаний без дренажа на песке (таблица 1), представлены на рис. 14 (b). Рис. 14, кажется, предлагает хорошие согласования, несмотря на тот факт, что прогноз основан на статическом поведении, в то время как наблюдение проводится на динамическом аспекте поведения песка.

В заключение можно отметить, что на основе пяти фундаментальных постулатов была предложена модель, с помощью которой есть возможность оценить развитие поровых давлений и деформаций сдвига в элементе песка при его циклическом нагружении в недренированных условиях. Характеристики песка, предсказанные этим методом, оказались актуальными и полезными для оценки развития динамического порового давления и последующего возникновения разжижения в широком диапазоне условий нагружения от статических до динамических, с контролем напряжения до контролируемого напряжения и от равномерных до нерегулярных циклов. возбуждения.

**Использованные источники:**

1. СП 34.13330.2021 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85»;
2. СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85»;
3. ГОСТ 30672-99 «Грунты. Полевые испытания. Общие положения»;
4. ГОСТ 20276-99 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости».

5. Ishihara, K. and Yasuda, S. (1972): " Разжижение песка из-за нерегулярного возбуждения," Solis and Foundations, Vol. 12, No. 4, pp. 65-77.
6. Tatsuoka, F. and Ishihara, K. (1973): «Путь напряжения и характеристики дилатансии песка" Proc. 8 th ICSMFE, Vol. 1, pp. 419- 424.

**Sources used:**

1. SP 34.13330.2021 " Automobile roads. Updated version of SNiP 2.05.02-85»;
2. SP 78.13330.2012 " Automobile roads. Updated version of SNiP 3.06.03-85»;
3. GOST 30672-99 " Soils. Field tests. General provisions»;
4. GOST 20276-99 " Soils. Methods for field determination of strength and deformability characteristics".
5. Ishihara, K. and Yasuda, S. (1972): "Sand liquefaction due to irregular excitation," Solis and Foundations, Vol. 12, No. 4, pp. 65-77.
6. Tatsuoka, F. and Ishihara, K. (1973):" Stress path and sand dilatancy characteristics " Proc. 8 th ICSMFE, Vol. 1, pp. 419 - 424.