

УДК 624.131.537 (574)(04)

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВ И СКАЛЬНЫХ ПОРОД И ИХ УЧЕТ ПРИ ВЫБОРЕ РАСЧЕТНОЙ АКСЕЛЕРОГРАММЫ

Чукин Р.Б.

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР

Особенности динамической неустойчивости несвязных грунтов

Наибольшее количество работ по изучению грунтов при динамических нагрузках как экспериментальных, так и аналитических посвящено пескам. Это связано, с печальным опытом катастрофического разжижения песчаных грунтов, имевшего место при землетрясениях в Японии, на Аляске, в Калифорнии, на Филиппинах и в других местах земного шара. Второй причиной детального изучения особенностей динамической неустойчивости песков является удобство их использования в лабораторных экспериментах: легкость в приготовлении небольших образцов с заданными свойствами и относительная независимость их поведения от минерального состава при близком размере зерен.

Характерными формами реакции песчаных грунтов на динамические нагрузки являются:

1. уплотнение (отрицательная дилатансия) рыхлого песка любой влажности;

2. разжижение водонасыщенного песка, связанное с быстрым нарастанием порового давления на фоне уплотнения грунта вплоть до исчезновения эффективных напряжений;
3. разуплотнение (положительная дилатансия) маловлажных плотных песков, сопровождающееся и их разупрочнением /1/.

Подразжижением грунта вообще следует понимать его переход в текучее состояние вне зависимости от причины такой трансформации: это может быть действие как статической, так и динамической нагрузки, а также подъем уровня грунтовых вод или возникновение значительных градиентов напора. Под динамическим разжижением понимают переход грунта в текучее состояние в результате потери прочности при разрушении структурных связей динамической нагрузкой. Такое разжижение песчаных грунтов связано со стремлением рыхлого грунта к сокращению объема и «взвешиванием» частиц в воде с исчезновением эффективных напряжений. К рыхлой системе относятся пески с относительной плотностью до 0,45 /2/. Под плотными понимаются пески с относительной плотностью более 0,6. Таким образом, пески средней относительной плотности характеризуются значением данной величины в диапазоне 0,45-0,6. Пример иллюстрирующий разжижение песка, в лабораторных условиях, с относительной плотностью 0,5 показан на рисунке 1. До тех пор пока значение относительного порового давления не достигает 100%, деформации незначительны. Как только поровое давление становится равным эффективному напряжению, после 24 циклов нагружения, деформации начинают очень быстро увеличиваться /3/.

Динамические испытания крупнообломочных грунтов из-за больших размеров образцов требуют громоздкого оборудования, либо проводятся в полевых условиях. Практический интерес к таким исследованиям невелик из-за достаточной устойчивости оснований из крупнообломочных грунтов в условиях динамических нагрузок, хотя

известны отдельные случаи их динамического разжижения в основном при сильных землетрясениях /4/.

Однако внимательный анализ этих ситуаций показал /5/, что разжижение водонасыщенных гравийно-галечных отложений при интенсивном динамическом воздействии может иметь место в двух случаях:

1. при высоком содержании пылевато-песчаного заполнителя, в котором при этом не менее 32-40% частиц мельче 0,02 мм, и рыхлом сложении, гравийные и галечные частицы как бы «плавают» в пылевато-песчаном заполнителе, поведение которого определяет возможность динамического разжижения грунта в целом; при этом разжижается сам заполнитель, а тяжелые обломки «тонут» в нем;

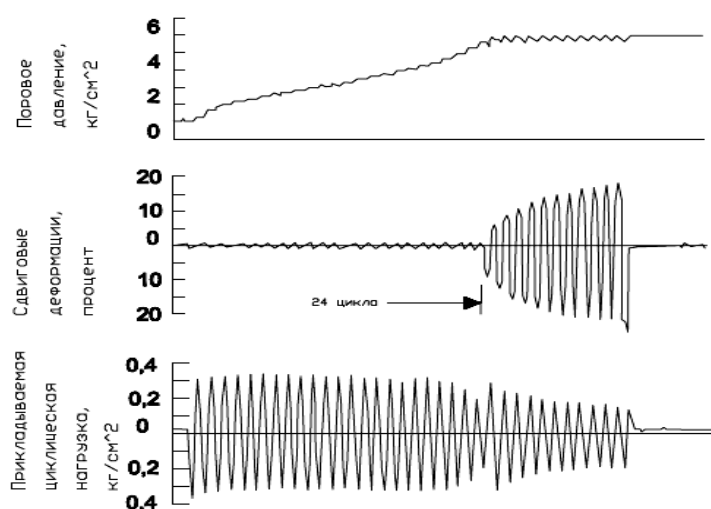


Рис.1 Нарастание порового давления из-за приложения циклической нагрузки и разжижение песка после 24 циклов нагружения с относительной плотностью 0,5

2. если залегающие на небольшой глубине гравелистые грунты имеют над собой слой с существенно меньшей водопроницаемостью, который препятствует быстрой

диссипации избыточного порового давления при сейсмическом толчке.

Чистые же гравийно-галечные грунты являются динамически надежными основаниями даже при их подводном залегании. Таким образом, крупнообломочные грунты при отсутствии заметного количества пылевато-песчаного заполнителя можно считать динамически устойчивыми. Это обусловлено их слабой сжимаемостью и высокой водопроницаемостью, что исключает возникновение избыточного порового давления. К этой же категории, как показано в работе /6/, следует относить и гравелистые пески, а также, наиболее крупнозернистые их виды.

Существует несколько закономерностей динамической неустойчивости несвязных грунтов:

1. Гравелистые пески и крупнообломочные грунты без существенного количества пылевато-песчаного заполнителя можно считать динамически устойчивыми, но только при отсутствии над ними в геологическом разрезе слоя пород с низкой водопроницаемостью, который препятствует быстрой диссипации избыточного порового давления при сейсмическом толчке и может привести к разжижению даже гравийно-галечных грунтов;
2. Определяющее влияние на поведение всех песков оказывает степень инверсии напряжений. Инверсия знака напряжений обеспечивает достижение 100%-го относительного порового давления, т.е. отношение эффективного напряжения к индуцированному поровому давлению динамической нагрузкой, в песках любой плотности. Так же это приводит к формированию в песке ослабленных зон разуплотнения, в том числе и в сухих песках, в пределах которых происходит внезапное разрушение (для водонасыщенного песка оно может интерпретироваться и как разжижение — в этой разуплотненной зоне);

3. Длительные пульсирующие нагрузки, особенно при небольших амплитудах деформации, не позволяют плотному водонасыщенному песку мобилизовать значительное сопротивление сдвигу и приводят к медленной переупаковке зерен и внезапному разжижению грунта, начинающемуся в пределах сформировавшихся ослабленных зон;
4. Только при значениях высокой относительной плотности сложения более 0,7 песок хорошо сопротивляется разжижению при различных условиях динамической нагрузки. Пески же с меньшей относительной плотностью, разжижаться при длительных динамических нагрузках. Эта форма реакции связана с формированием в грунте зон дилатансии;
5. Наиболее универсальной формой динамической неустойчивости песков (как при положительной, так и отрицательной их дилатансии) является циклическая подвижность, которая может проявляться по-разному в зависимости от плотности грунта и условий нагружения: как быстро нарастающая циклическая подвижность, приводящая к разрушению грунта без его разжижения; как медленное накопление деформаций до критического уровня; как затухающая циклическая подвижность, стабилизирующаяся на определенном уровне амплитуды деформации. Эта форма реакции проявляется при положительном поровом давлении в течение хотя бы части цикла нагружения. Стабилизация процесса возможна, если максимальное значение относительного порового давления не превышает 70%. Поэтому данную величину следует рассматривать как критическую, выше которой возможно разрушение.

Важной характеристикой динамической нагрузки, как уже было сказано в пункте 2, особенно часто используемой при анализе

результатов испытаний, является величина коэффициента асимметрии цикла $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. Можно выделить несколько видов динамической периодической нагрузки в зависимости от этой величины. В общем виде их можно свести к нескольким вариантам. Один из возможных вариантов несимметричной динамической нагрузки представлен на рисунке 2: $\sigma_{\max} \neq \sigma_{\min}$, $\sigma_{\min} \neq 0$. Сейсмическая нагрузка является знакопеременной и несимметричной, т.е., когда в течение цикла сжимающие напряжения сменяются растягивающими и $\sigma_{\min} < 0$. Для симметричной знакопеременной нагрузки $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$, $\sigma_{\text{ср}} = 0$, где $\sigma_{\text{ср}}$ - среднее напряжение цикла.

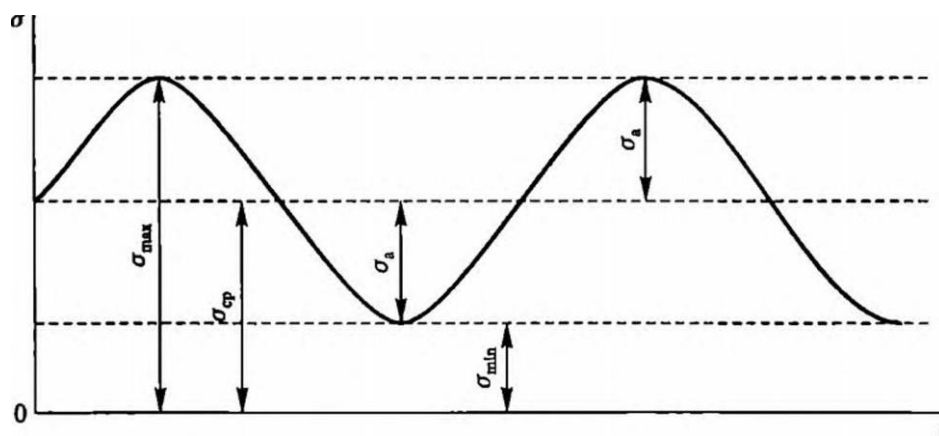


Рис.2 Изменение напряжений циклического воздействия во времени
(несимметричная нагрузка)

Пульсирующая нагрузка характеризуется соотношением $\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_{\text{ср}} = \sigma_a$, где $\sigma_a = \sigma_{\max} / 2$ - амплитуда цикла, равная по модулю максимальному отклонению напряжения от его среднего значения за цикл.

Особенности динамической неустойчивости глинистых грунтов

Термин «тиксотропия» был введен в 1927 г. Г.Фрейндлихом и Т.Петерфи для обозначения превращений геля в жидкость, а потом снова в гель при механическом воздействии и неизменной температуре. Основы современных представлений о тиксотропии

были сформулированы в появившейся в 1935 г. одноименной книге Г.Фрейндлиха. Однако первым, кто наблюдал проявление тиксотропных свойств глин в полевых условиях, понимая, что, собственно, происходит с грунтом, был, А.М. Аттерберг. Его представления о причинах жидкообразного поведения пласта водонасыщенных глин при строительстве железной дороги на севере Швеции были опубликованы в немецком агрономическом журнале еще в 1908 г. Позже понятие тиксотропии было постепенно расширено и стало применяться ко всем системам, склонным к временному изменению своей консистенции при деформировании.

Под тиксотропией понимается физико-химическое явление, присущее коагуляционным дисперсным системам и выражающееся в полном или частичном разрушении структурных связей грунта под действием динамической нагрузки и последующем самопроизвольном их восстановлении (в состоянии покоя), протекающее при неизменных температуре и влажности. Условие постоянства влажности грунта означает, неизменность пористости системы при тиксотропных процессах. Важным свойством тиксотропных систем является их полная обратимость, т.е. восстановление прочности до исходного уровня независимо от количества циклов «разрушение-восстановление».

Схематическая кривая этих превращений для чисто тиксотропной системы приведена на рисунке 3, а. Однако, в силу ряда причин, природные связные грунты, как правило, не обладают этим свойством — их конечная прочность после завершения восстановления либо не достигает исходного уровня (рис. 3, б), либо превышает его (рис. 3, в). Поэтому говорят о квазитиксотропности [7] таких грунтов, принимая во внимание, что в основе их реакции на динамическую нагрузку лежат все же тиксотропные процессы, осложненные некоторыми особенностями.

Квазитиксотропия как характерный механизм динамической неустойчивости слабых связных грунтов проявляется в форме их разупрочнения при неизменных объеме и влажности и может быть частичным или практически полным. В последнем случае происходит разжижение грунта, хотя и достаточно редко по сравнению с песками и слабосвязными грунтами, и чаще наблюдается в лабораторном эксперименте, чем в полевых условиях.

Степень квазитиксотропности глинистых грунтов зависит от двух групп факторов: 1) «внутренних» — характеризующих состав и состояние самого грунта и 2) «внешних» — характеризующих динамическое воздействие.

Важнейшими «внутренними» факторами, определяющими прочность структурной сетки грунта, являются его влажность и химико-минеральный состав, дисперсность, присутствие органического вещества и других особенностей и комплексно характеризующая величиной удельной поверхности грунта.

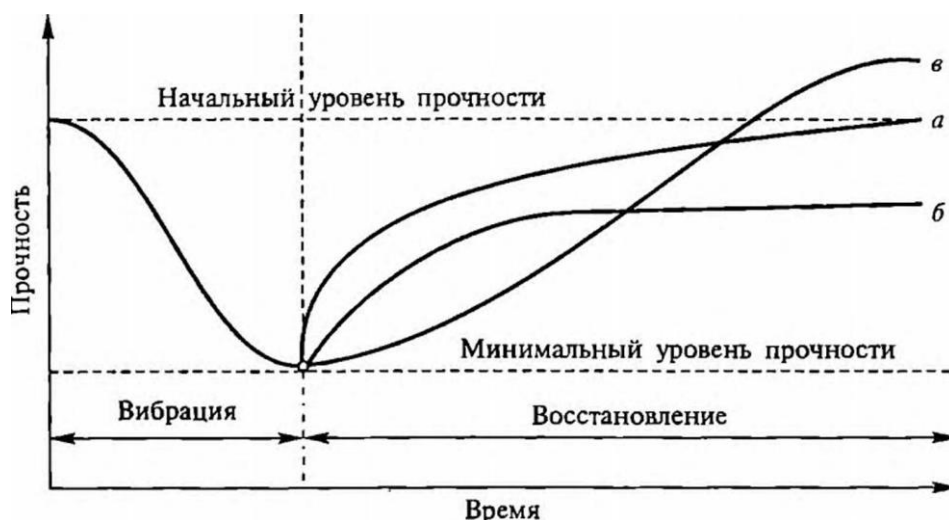


Рис.3Схема восстановления прочности тиксотропной системы (а) и квазитиксотропных природных грунтов (б, в)

Влияние влажности изучено достаточно подробно. Ее увеличение ускоряет снижение прочности при динамическом воздействии. Это объясняется ослаблением структурных связей и увеличением подвижности частиц по мере утолщения их водных оболочек. Величина влажности максимального разупрочнения не зависит от параметров динамической нагрузки и определяется параметрами грунта.

Информация, касающаяся влияния физико-химического строения твердой компоненты увлажненных глинистых грунтов, неоднозначна и противоречива. Это вполне закономерно ведь это влияние, является функцией множества факторов: дисперсности и химико-минерального состава, кристаллического строения и формы частиц, присутствия цементирующих веществ, наличия органического вещества в растворенной или свободной форме и т.д. Наиболее удобной и, главное, экспериментально определяемой интегральной характеристикой физико-химической активности грунта, учитывающей все эти факторы, является величина его удельной поверхности. Под удельной поверхностью понимается усреднённая характеристика размеров внутренних полостей (каналов, пор) пористого тела или раздробленных частиц. Ее значения резко изменяются даже при небольшом изменении дисперсности системы, поэтому, оценивая тиксотропные свойства грунтов как функцию удельной поверхности, можно получить единую «шкалу» для сравнения реакции разных по составу и генезису грунтов. Более детально такие исследования до сих пор не проводились, однако результаты проведенных экспериментов зарубежными учеными показали перспективность такого подхода /1/. Мировой опыт изучения динамической реакции глинистых грунтов позволяет также сделать вывод о снижении вероятности их динамического разжижения с ростом дисперсности.

Максимальное при данных параметрах динамической нагрузки разупрочнение грунта достигается после совершения над ним определенной работы, которая является функцией времени. Установлено /7/, что этот интервал времени не превышает 5 мин для глинистых грунтов пластичной консистенции и снижается до 1-3 мин при испытаниях образцов текучепластичной консистенции (т.е. увеличение влажности ускоряет разрушение структурных связей грунта).

С увеличением силовых характеристик, т.е. амплитуды и виброускорения возрастает энергия динамического воздействия на грунт, вызывая рост разупрочнения, который, однако, является затухающим: ведь при определенных значениях этих параметров достигается критический уровень энергии воздействия. При этом разрушается большинство структурных связей, определяющих прочность грунта, и дальнейшее увеличение амплитуды напряжений и ускорения колебаний уже не может привести к сколько-нибудь заметному дополнительному разупрочнению. Наибольший спад прочности наблюдается при виброускорениях до 0,5-0,7g, что в реалиях соответствует очень сильному землетрясению /7/. Виброускорение не является независимым параметром динамической нагрузки и, в свою очередь, зависит от амплитуды и частоты колебаний. Если виброускорение изменяется только за счет амплитуды при постоянной частоте, то справедливы приведенные выше рассуждения. Если же меняется и частота динамического воздействия, то характер рассмотренных зависимостей усложняется. Вопрос о влиянии частоты нагружения на динамическую реакцию дисперсных грунтов вообще и глинистых в особенности является одним из наиболее неопределенных в современной динамике грунтов. Опыт зарубежных ученых показывает, что подобная зависимость существует. Например, для ила из залива Сан-Франциско, при

проведении динамических испытаний, увеличение частоты колебаний с 1 до 2 Гц существенно изменяет количество циклов воздействия, необходимых для разрушения образцов /8/.

Основная причина частотной зависимости реакции грунта — разная длительность фаз нагружения и разгрузки в цикле воздействия при различной частоте: чем ниже частота нагружения, тем дольше максимальные динамические напряжения действуют на грунт в каждом цикле. Но эта причина не единственная. Основываясь на экспериментальных литературных данных, можно указать, еще пять частотно-зависимых эффектов, в той или иной мере определяющих влияние частоты воздействия на динамическую реакцию дисперсных грунтов: 1) темпы диссипации порового давления, 2) рост энергии воздействия с частотой, 3) резонансные явления, 4) проявление ползучести и 5) тиксотропные явления. С инженерной точки зрения диапазон «низких» частот можно, несколько условно разделить на сейсмические (от долей до первых герц) и вибрационные (обычно более 5 Гц) частоты, в которых проявление указанных эффектов происходит по-разному.

Частотная зависимость динамической реакции глинистых грунтов осложнена эффектами резонанса, частичного тиксотропного восстановления и ползучести. Их совместное влияние приводит к тому, что прочность грунта обычно падает при снижении частоты в «сейсмической» области и при ее увеличении — в «вибрационной», где возможно еще и резонансное усиление разупрочнения. И чем выше влажность глинистого грунта, тем более выражено влияние частоты динамической нагрузки на его поведение.

Конечная прочность тиксотропной системы после завершения ее упрочнения есть величина постоянная, не зависящая от характеристик действовавшей динамической нагрузки. Восстановленная же прочность квазитиксотропного грунта, напротив, является в какой-то

мере функцией степени разрушения их природной структуры и, следовательно, определяется интенсивностью динамической нагрузки. При этом с ростом энергии воздействия конечная прочность снижается для грунтов, поведение которых характеризуется кривой б на рис.3, и, как правило, немного увеличивается для случая, представленного кривой в.

Тиксотропность, не является характерным свойством глин вообще. Они могут быть более или менее тиксотропны в зависимости от своей физико-химической структуры в присутствии влаги и ряда других факторов. Длительность тиксотропного восстановления и упрочнения структурных связей, по данным разных авторов, значительно варьируется для глин различного химико-минерального состава, дисперсности и влажности.

Наибольший прирост прочности грунта обычно отмечается в течение первых 3-10 минут отдыха, и с этой точки зрения весь процесс восстановления можно разделить на два этапа: начальный, когда формируется, в основном, структурная сетка, и завершающий, связанный с ее дальнейшим упрочнением. В ряде работ, посвященных вопросам тиксотропии, существенная роль отводится так называемому «мгновенному» тиксотропному упрочнению, проявляющемуся сразу после прекращения воздействия по причине того, что в это время существует максимальное количество «свободных» частиц, потенциально способных к участию в восстановлении структурной сетки. Экспериментально доказано /1/ отсутствие мгновенного восстановления прочности в природных глинистых грунтах, после динамического воздействия. Это обусловлено значительной инерцией крупнопылеватых частиц, а также высокой вязкостью природных грунтов из-за относительно невысокой влажности.

Особенности динамической неустойчивости скальных пород

Грунты, имеющие жесткие структурные связи характеризуются усталостным разрушением. Под усталостью обычно понимается снижение прочности и повышение деформируемости материалов в условиях динамического нагружения. Эти эффекты для грунтов остаются слабо изученными по сравнению с другими формами динамической неустойчивости, характерными для связных и несвязных грунтов. Кроме того, отсутствие единой теории усталости горных пород заставляет опираться на представления, разработанные для металлов и других высокопрочных материалов, имеющих ограниченное применение для неоднородных сред.

В условиях динамического нагружения разрушение многих материалов, в том числе и грунтов, происходит при меньшей нагрузке, чем в случае ее постепенного роста. При этом амплитуда динамической нагрузки, необходимая для разрушения, уменьшается с увеличением числа циклов нагружения (N). Эта зависимость известна как кривая Вёлера— немецкого железнодорожного инженера, впервые обнаружившего явление усталости, разработавшего методику определения предела усталости и сформулировавшего некоторые закономерности усталостной прочности деталей и агрегатов подвижного состава. Наибольшие напряжения, при которых материал может длительное время сохранять целостность в условиях динамических нагрузок без разрушения, является его пределом усталостной прочности, или пределом усталости (σ_y) данного материала, и определяется по горизонтальному участку кривой Вёлера показанной на рисунке 4.

В настоящее время считается, что усталостное разрушение всегда начинается у некоторой неоднородности в материале, вызывающей концентрацию напряжений. Из имеющихся в ограниченном количестве экспериментальных данных, описанных в

литературе, следует, что проявление усталостных свойств горных пород под действием динамических нагрузок происходит более интен-

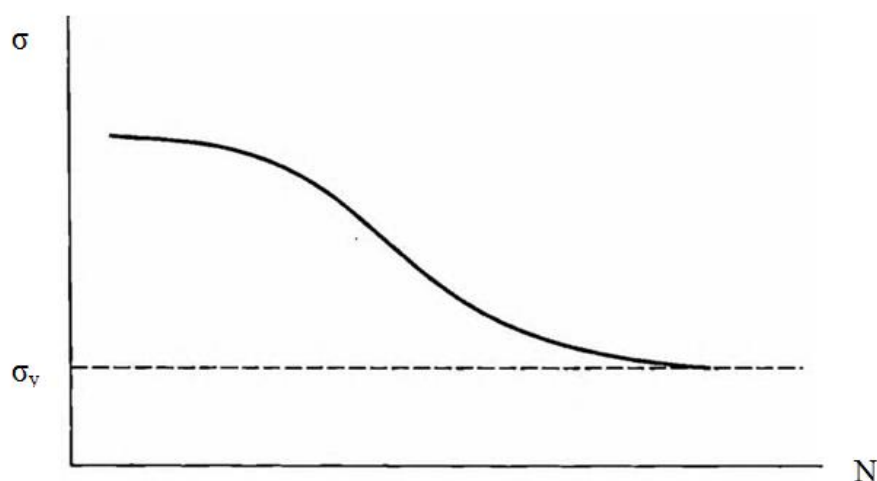


Рис.4 Уменьшение разрушающей амплитуды динамической нагрузки с ростом числа циклов нагружения (кривая Вёлера)

сивно и при значительно меньшем числе циклов нагружения, чем у металлов и других высокопрочных материалов. Это обусловлено, более высокой структурной неоднородностью горных пород и различными «дефектами», трещинами и т.д.

Таким образом, грунтам с жесткими структурными связями, подобно другим высокопрочным материалам, присущи усталостные свойства, причем выраженные более резко в силу их существенной неоднородности. Считается установленным, что происходит заметное снижение прочности таких грунтов в условиях динамического нагружения по сравнению со статическими, подобные грунты обладают меньшей сопротивляемостью растягивающим циклическим нагрузкам, чем сжимающим. Сведения, касающиеся количественных закономерностей их усталостного разрушения и деформирования в зависимости от вида грунта и условий нагружения, до сих пор еще слабо изучены.

Несмотря на ограниченный объем имеющегося экспериментального материала, он все же поддается определенному

обобщению — по крайней мере, до уровня выделения некоторых качественных закономерностей усталостного поведения грунтов в зависимости от ряда факторов. При рассмотрении усталости грунтов как внутренне присущего им свойства, которое определяется их составом и структурно-текстурными особенностями, в настоящее время можно говорить лишь о самых общих различиях усталостного поведения определенных типов пород, резко несхожих по составу, условиям образования, а, следовательно, и прочности структурных связей, которые в большей степени определяют их прочность и деформируемость, чем соответствующие параметры самих кристаллов, зерен и обломков пород. Поэтому, как и в металлах, усталость грунтов определяется существующими в них всевозможными неоднородностями. Это разная крупность зерен, неравномерное распределение цемента, трещины, различные включения, даже различная ориентация соседних зерен. В связи с неоднородностью горных пород в них при нагружении возникает вторичное поле напряжений, а в местах их концентрации зарождаются микротрещины. Из этих рассуждений, очевидно, что при прочих равных условиях большей усталостной долговечностью обладает грунт с меньшим количеством концентраторов вторичных напряжений, т.е. менее трещиноватый, более цельный. И в идеале при отсутствии концентраторов напряжений усталостного разрушения происходить не должно.

Что же касается параметров действующей нагрузки, то они определяют степень проявления грунтом усталостных свойств в конкретной обстановке.

Влияние количества циклов нагружения N на изменение показателей прочностных и деформационных свойств грунтов очевидно и следует из самого понятия усталости. В целом же приводимые разными авторами эмпирические уравнения,

описывающие снижение прочности различных пород с увеличением N как в условиях сжатия, так и при растяжении, имеют вид:

$$\frac{\sigma_{max}N}{\sigma_{ст}} = a - blgN, \quad (1)$$

где $\sigma_{ст}$ - предел прочности в статических условиях, $\sigma_{max}N$ – разрушающее напряжение после N циклов нагружения, a и b – константы.

Влияние силовых характеристик динамической нагрузки на усталостное поведение грунтов, подразумевает: а) максимальное действующее напряжение цикла σ_{max} , б) амплитуда напряжений цикла σ_a , в) среднее σ_{cp} , г) минимальное σ_{min} напряжение цикла. Очевидно, что все они связаны между собой. Поэтому целесообразно исключить из рассмотрения влияние величин σ_{cp} и σ_{min} .

Величина σ_{max} оказывает наибольшее влияние на прочностные и деформационные характеристики горных пород: чем выше эта величина, тем значительнее рост продольных и поперечных деформаций с увеличением числа циклов нагружения. Таким образом, повышение σ_{max} приводит к более интенсивному снижению прочности грунта при динамическом воздействии/9/.

Влияние частоты приложения нагрузки на интенсивность усталостных процессов в грунтах и высокопрочных материалах практически не изучено. В проводившихся исследованиях их авторы, как правило, ограничивались поддержанием частоты нагружения на постоянном уровне для получения сопоставимых результатов. Однако для ряда горных пород показано влияние частоты приложения нагрузки на усталостные процессы в них /10/. Очевидно, что частота воздействия определяет скорость нагружения материала и, следовательно, является энергетической характеристикой процесса.

Заключение

На основе выше изложенного материала можно построить общую классификацию грунтов по специфике их динамической неустойчивости (табл.1).

Для инженеров проектировщиков, занимающихся расчетами сейсмической устойчивости грунтовых геотехнических объектов по прямому динамическому методу накопленный опыт зарубежных исследователей, описываемый в данной статье, является напутствием для выбора расчетной записи акселерограммы землетрясения. Это связано с тем, что разные характеристики динамической нагрузки оказывают разное влияние на определенные типы грунтов. Данный выбор должен основываться на геологическом разрезе площадки строительства с определением преобладающего типа грунта в нем и моделировании наихудших сейсмических событий для конкретного случая. Например, для основания содержащего водонасыщенные пески выбор расчетной записи должен базироваться на ее продолжительности. Частотные характеристики и пиковые ускорения играют важную роль в исследовании сейсмической неустойчивости песчаных грунтов, но как уже было описано выше, даже плотные пески способны разжижаться после продолжительной сейсмической нагрузки. В задачи инженеров входит определение максимально возможных зон подверженных разжижению и их влияние на устойчивость возведенной грунтовой дамбы, для этого рекомендуется использовать акселерограммы продолжительностью более 60 секунд содержащие различные частоты спектра ускорений. Пример расчетной записи подходящей для моделирования сейсмической реакции основания содержащего водонасыщенные пески показан на рисунке 5.

Для глинистых грунтов, необходимо выявление резонансных эффектов и их влияние на устойчивость возведенной дамбы. Для этого расчетные записи должны содержать различные спектры по частотному составу. Продолжительность тряски немаловажный фактор, но его роль не так значительна как для расчета основания содержащего пески.

Для скальных пород, которым характерно усталостный вид сейсмической неустойчивости, важна максимальная амплитуда динамической нагрузки для выявления зон напряжения с последующим возникновением трещин. В качестве расчетных записей желательно делать свой выбор на акселерограммах содержащих большое количество пиков ускорений близких к максимальным. Пример подобного типа записи показан на рисунке 6.

Таблица1. Классификация грунтов по типу их динамической неустойчивости

Классы грунтов	Группы грунтов по типу динамической неустойчивости	Подгруппы грунтов по особенностям проявления динамической неустойчивости
С жесткими структурными связями (скальные и полускальные)	Усталостно-неустойчивые	С усталостью – из-за неоднородности породы возникают места концентрации напряжений зарождающие микротрещины
Без жестких структурных	Дилатантные	Способные к проявлению дилатансии разного знака
		Проявляющие только отрицательную дилатансию (уплотняющиеся)
	Дилатантно-	С преобладанием тиксотропных эффектов

связей (дисперсные)	тиксотропные	С преобладанием уплотнения
	Квазитиксотропные	Не достигающие исходной прочности (частично восстанавливающиеся)
		Повышающие прочность выше сходного уровня (упрочняющиеся)

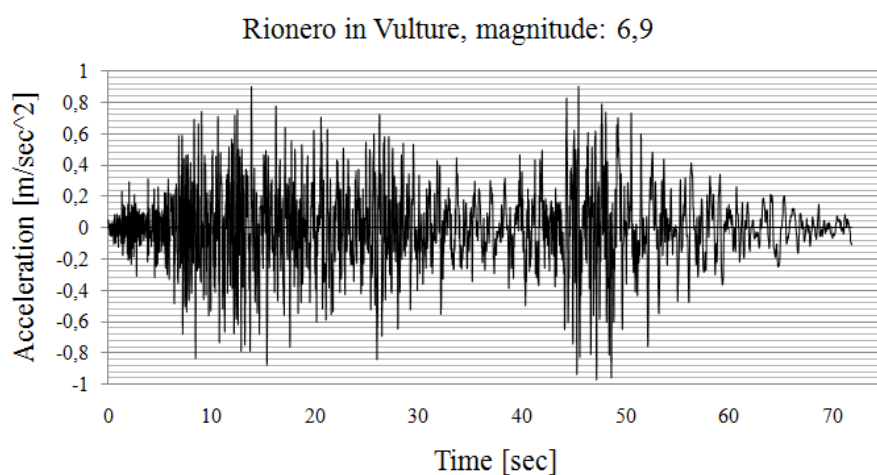


Рис.5 . Характерная расчетная запись ускорений для оценки сейсмической реакции оснований содержащих водонасыщенные пески, продолжительностью 71 секунда

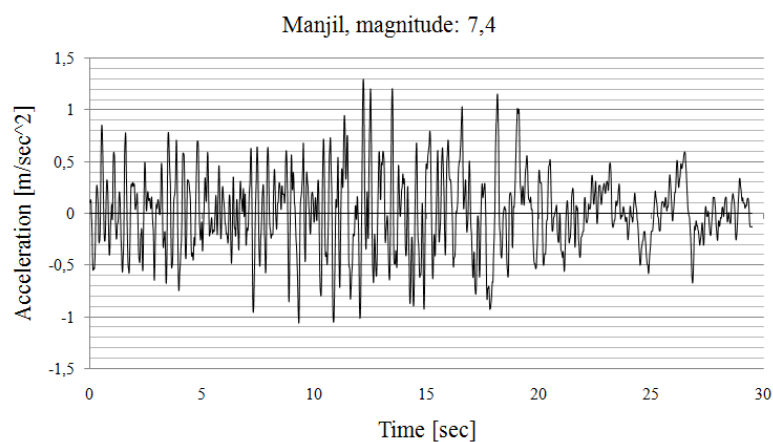


Рис.6 Характерная расчетная запись ускорений для оценки сейсмической реакции скальных оснований, продолжительностью 29 секунд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский Е. А. Динамические свойства грунтов и их учет при анализе вибраций фундаментов разного типа // Геозкология. 1993. № 5. С. 37-65.
2. Vaid Y. P., Chern J.C. Mechanism of deformation during cyclic undrained loading of saturated sands // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1983. V. 2. №2. P. 171-176.
3. Seed H. B. Landslides during earthquakes due to soil liquefaction, ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. 1968. V.94. №SM5. P. 1053-1122.
4. Ishihara K. Stability of natural deposits during earthquakes. Theme lecture: Proceedings 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco.1985. V. 2. P. 321-376.
5. Valera J. E., Kaneshiro J. Y. Liquefaction analysis for Rubber Dam and review of case histories of liquefaction of gravels / Proceedings: 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis. 1991.P.347-356.
6. Tsuchida Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits. Abstract of the Seminar in the Port and Harbor Research Institute. 1970. P. 3.1-3.3
7. Вознесенский Е.А., Калачев В. Я., Трофимов В. Т., Коваленко В. Г. Квazитиксотропные изменения в глинистых грунтах. М.: Изд-во МГУ. 1990. 143с.
8. Thiers G. R., Seed H. 5. Strength and stress-strain characteristics of clay / Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations, ASTM STP 450. 1969. P. 3-56.
9. Мохначев М.П. Усталость горных пород. М.: Наука. 1979. 151с.
10. Suzuki K., Nishimatsu Y, Heroesewojo R. Rheological properties of rocks under the pulsating compressive load // Journal of Mining and Metallurgy Institute of Japan. 1970. V. 86. №987.P. 413-418.