

### **Примечание для редактора:**

Природное и техногенное динамическое воздействие существенно влияет на механическое поведение дисперсных грунтов. В зависимости от амплитуды и частоты воздействия может наблюдаться как постепенное накопление дополнительной деформации, известное как виброползучесть, так и мгновенная потеря несущей способности - динамическое разжижение.

Для лабораторных испытаний в данном случае используется специализированное оборудование - приборы динамического трехосного сжатия. Новая статья из цикла о лабораторных методах испытаний посвящена особенностям проведения данных испытаний.

### **Испытания динамического трехосного сжатия**

**Мирный А.Ю.**, к.т.н., старший научный сотрудник Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

**Идрисов И.Х.**, к.т.н., генеральный директор ООО НПП «Геотек», г. Пенза

Большинство практических задач геотехники предполагает статический режим приложения нагрузки к основанию. Тем не менее, хорошо известны особые случаи, когда возникают динамические нагрузки различной частоты и амплитуды. К таковым относятся сейсмическое воздействие, действие ветра и волн, техногенное воздействие от транспорта и промышленных машин, и прочие. В комбинации со статической нагрузкой это воздействие формирует разнообразные напряженные состояния. Подробно эти вопросы рассматриваются в известной монографии К. Ишихары, переведенной на русский язык, а также в работах отечественных исследователей – П.Л. Иванова, В.А. Ильичева, Л.Р. Ставницера, Е.А. Вознесенского и других.

В зависимости от параметров динамического воздействия в дисперсных грунтах основания могут наблюдаться различные процессы. При высокой интенсивности воздействия, наблюдаемой в первую очередь при землетрясениях, по массиву грунта проходит фронт волны, вызывающий объемное сжатие. В случае водонасыщенных грунтов достаточно высокая скорость прохождения этого фронта не позволяет рассеиваться поровому давлению, в результате чего происходит накопление порового давления. Если накопленное поровое давление  $u_w$  сравнивается по величине с действующим средним

напряжением  $p$ , то отдельные частицы в скелете грунта потеряют контакт между собой. Это крайне опасное состояние называется *динамическим разжижением* – практически мгновенной потерей устойчивости скелета грунта. Помимо критического снижения несущей способности, динамическое разжижение приводит так же к существенным осадкам после рассеивания порового давления: вследствие разрушения структуры грунта его пористость после воздействия оказывается заметно ниже исходной. Катастрофические последствия землетрясений зачастую объясняются именно этими явлениями.

Очевидно, что механизм динамического разжижения может реализоваться только в полностью водонасыщенных грунтах с невысокой связностью. Если грунт не обладает 100% водонасыщением, то рост порового давления при воздействии будет пренебрежимо мал. Если связность достаточно высока, то вероятность разрушения структуры снижается. Следовательно, наиболее подвержены динамическому разжижению мелкие и пылеватые пески, а также супеси при полном водонасыщении. Для количественной оценки возможности динамического разжижения используется максимальное достигаемое отношение величины порового давления к среднему – *PPR (pore pressure ratio)*:

$$PPR = \frac{u_w}{p}.$$

При достижении  $PPR = 1$  фиксируется факт динамического разжижения. Из формулы следует, что при больших значениях среднего напряжения  $p$  вероятность этого снижается – следовательно, с увеличением глубины залегания динамическое разжижение становится маловероятным. Действительно, по данным различных источников наиболее опасными являются первые 5-7 метров от дневной поверхности.

В случае если энергия динамического воздействия недостаточно велика, чтобы вызвать мгновенное изменение напряженного состояния всего массива, могут наблюдаться дополнительные осадки без потери устойчивости – *виброползучесть*. При передаче на основание постоянных циклических нагрузок наблюдается колебание величины нормальной силы на контактах между отдельными частицами. Вследствие этого снижается сопротивление сдвигу, и действующие статические нагрузки вызывают дополнительные объемные и сдвиговые деформации. Подобная ситуация часто наблюдается в основаниях транспортных сооружений, возле фундаментов промышленного оборудования, а также вследствие технологических воздействий на основание при производстве земляных работ. Дополнительная возможная осадка за счет виброползучести оценивается путем снижения расчетной величины модуля деформации  $E$  до величины  $E_{vp}$ , отношение которых характеризуется коэффициентом виброползучести  $K_{vp}$ .

Многообразие возможных напряженных состояний при динамическом воздействии требует оборудования, позволяющего создавать и контролировать любые параметры НДС. Для этих целей лучше всего подходят приборы трехосного сжатия с возможностью динамического нагружения (иногда встречается термин «вибростабилометр», хотя это не совсем корректно, так как вибрацией обычно называют только высокочастотное низкоамплитудное воздействие). Подобное оборудование выпускается ведущими мировыми производителями, а также ООО НПП «Геотек».

Конструктивно прибор динамического трехосного сжатия отличается от обычного, «статического» стабилометра возможностью передачи на образец динамической составляющей вертикального давления. Для этого применяются специальные типы привода, каждый из которых обладает своими преимуществами. Конструктивно наиболее простым является пневматический привод, в котором передача динамической нагрузки обеспечивается изменением давления воздуха в пневмоцилиндре. Этот привод имеет ограничение по частоте, связанное с невозможностью мгновенного изменения давления вследствие сжимаемости рабочего тела – рабочая частота не превышает 5 Гц. Этого достаточно для моделирования сейсмического воздействия.

Более высокие частоты могут быть реализованы с помощью электромеханического привода с применением быстрой обратной связи: по показаниям датчика вертикального усилия производится корректировка текущего положения актуатора. Очевидно, что для передачи гармонического колебания (допустим, синусоидального) с приемлемой точностью необходимо иметь как минимум 10-20 точек измерений за цикл. Максимальная частота в данном случае определяется быстродействием системы преобразования сигнала обратной связи. Именно такой подход применяется в приборах ООО НПП «Геотек».

Наибольшую контролируемую частоту – вплоть до 100 Гц – позволяют реализовать приборы с сервогидравлическим приводом, в которых давление практически несжимаемого рабочего тела (масла) контролируется сервоклапаном. Однако такие приборы дороги и громоздки, сложны в эксплуатации, а настолько высокие частоты не востребованы (по данным авторов, максимальная нормируемая частота воздействия составляет 63 Гц).

Порядок проведения испытаний в различных режимах регламентирован ГОСТ 56353-2015 «Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов». Само испытание обычно проводится в консолидированно-недренированном режиме на образцах с высокой степенью водонасыщения. Учитывая, что водонасыщение является критическим условием при динамическом воздействии, применяются дополнительные меры, такие как продувка образца углекислым газом перед водонасыщением, тщательная дегазация жидкости, контроль параметра порового давления

В. Принципиально важным является корректное определение начальных условий испытания – соотношения между вертикальным и горизонтальным напряжениями, амплитуды динамической составляющей нагрузки. Именно это определяет точность воссоздания требуемого напряженного состояния и качество получаемых параметров, так как для каждого объекта условия уникальны.

При оценке возможности динамического разжижения к образцу прикладываются статическая и динамическая составляющая воздействия, в ходе опыта ведется контроль порового давления. Величина динамической нагрузки определяется магнитудой ожидаемого землетрясения. Факт динамического разжижения фиксируется по разрушению образца, либо достижению предельной деформации, либо достижению  $PPR = 1$ . Возможно также решение обратной задачи – испытание серии образцов с постепенным увеличением амплитуды и определение предельно допустимого воздействия.

При оценке виброползучести параметры воздействия определяются техническим заданием в зависимости от источника (например, в случае железнодорожного транспорта определяющими параметрами будут масса вагона, расстояние между осями колес, скорость движения). При этом следует учитывать, что вибрация достаточно быстро затухает по мере удаления от источника, в связи с чем может потребоваться непосредственное измерение интенсивности воздействия на объекте-аналоге. В ходе испытания к образцу прикладывается не менее 500 циклов динамического воздействия, чего обычно достаточно для дальнейшей экстраполяции по логарифмическому закону. Результатом опыта является расчетное значение относительной деформации образца с учетом вибрационного воздействия для количества циклов, соответствующего сроку эксплуатации сооружения. Данная величина может использоваться для расчета коэффициента виброползучести.

Несмотря на то, что ГОСТ 56353-2015, подробно описывающий процедуру динамических испытаний в стабилометрах, действует уже несколько лет, данные испытания по-прежнему проводятся в единичных лабораториях страны. Во многом это объясняется высокой стоимостью зарубежного оборудования. ООО НПП «Геотек» предлагает приборы динамического трехосного сжатия различных конфигураций. В состав комплекса



входит необходимое оборудование для создания статического и динамического вертикального воздействия, давления в камере и поровом пространстве, а также сами камеры трехосного сжатия с необходимой измерительной аппаратурой. Испытания проводятся в автоматизированном режиме с контролем всех параметров в режиме реального времени.

Более подробную техническую информацию можно получить у специалистов компании или на сайте [www.npp-geotek.ru](http://www.npp-geotek.ru).

### **Список литературы**

1. Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х. Методы определения динамических свойств грунтов. М.: ООО «Прондо», 2018, 488 с.
2. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов. М.: УРСС, 2014, 264 с.
3. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях. СПб: НП «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006, 384 с.
4. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
5. ГОСТ 56353-2015. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов.
6. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах.
7. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.
8. СП 120.13330.2012. Метрополитены.