

А. В. НИКОЛАЕВ

О СЕЙСМИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА РЫХЛЫХ ГРУНТАХ

Опыт, накопленный в результате обследования последствий многих сильных землетрясений, показывает, что существуют некоторые устойчивые закономерности в особенностях сейсмических проявлений на рыхлых грунтах.

1. Самая верхняя часть грунта (первые десятки метров) наиболее существенно влияет на сейсмический эффект.

2. Слой рыхлого грунта толщиной в несколько метров может оказать существенное влияние на сейсмический эффект, хотя, казалось бы, он должен быть прозрачен для сейсмических волн со сравнительно большими преобладающими периодами.

3. Близость грунтовых вод благоприятствует усилению сейсмического воздействия.

4. Жесткий слой у поверхности, лежащий на пачке рыхлых слоев, уменьшает интенсивность сейсмического воздействия на сооружение [2, 4].

Перечисленные закономерности не всегда находят удовлетворительное объяснение с точки зрения классической теории упругих волн. Это заставляет внимательнее рассмотреть механизм деформации и передачи упругой энергии в рыхлых грунтах.

Обычно под рыхлостью понимают способность грунта рыхлиться т. е. терять свою сплошность под воздействием растягивающих напряжений. Таким образом, сопротивление на разрыв является количественной мерой рыхлости. Совершенно ясно, что при сжатии рыхлое тело будет деформироваться иначе, чем при растяжении. Это особенно отчетливо видно в предельном случае, на примере сыпучих сред: чтобы уменьшить объем горсти песка хотя бы на один процент, требуется значительное сжимающее напряжение, между тем можно подбросить песок в воздух, и он займет очень большой объем, на что напряжения вовсе не потребуются. Значит, можно взять и другую меру рыхлости—неодинаковую способность среды принимать деформации сжатия и разрежения. Гуковская модель упругости описывает предельное явление—одинаковую способность среды растягиваться и сжиматься. Другое предельное явление—отсутствие напряжений, препятствующих растяжению сыпучих сред. Рыхлая среда занимает промежуточное положение.

Простейшей моделью упругости рыхлого тела является следующая.

При деформации растяжения среда характеризуется меньшими значениями упругих постоянных Ламе λ и μ , чем при деформациях сжатия. Отсюда следует, что при воздействии растягивающих напряжений модуль Юнга меньше, чем при воздействии сжимающих; скорость распространения продольных волн сжатия больше, чем волн разрежения. Поперечные волны не несут с собой изменений объема среды, но чувствительны к деформациям сжатия и разрежения, изменяющим модуль сдвига μ . Поэтому в случае интерференции продольных и поперечных волн происходит сложное изменение формы последних, так как продольная волна, влияя на модуль μ , тем самым как бы модулирует амплитуды и скорости смещения частиц в поперечной волне. Все сказанное относится к абсолютным деформациям разрежения и сжатия, а не к относительным, переносимым сейсмическими волнами. Напряжения сжатия в реальных средах растут с глубиной, каждый горизонт испытывает на себе давление со стороны вышележащего слоя. Поэтому абсолютные разрежения в продольных волнах возможны лишь у самой поверхности грунта.

Нелинейность закона Гука в большом диапазоне напряжений является общим качеством, в той или иной мере присущим всем реальным телам [1]. Наиболее ярко оно проявляется в сыпучих средах, гораздо слабее — в нерыхлых средах: скальных породах, металлах и т. д. Рыхлые среды занимают промежуточное положение между сыпучими и нерыхлыми. Предложенную модель упругости можно рассматривать как следующее приближение, позволяющее характеризовать все упругие среды новым свойством — неодинаковой способностью сопротивляться деформациям сжатия и растяжения. Основные особенности характера распространения упругих волн в такой среде хорошо качественно согласуются с известными закономерностями сейсмических проявлений, наблюдаемых при сильных землетрясениях на рыхлых грунтах.

Особенности сейсмических колебаний рыхлого грунта рассмотрены в работе [3]. Исследование характера движения точек среды вблизи свободной поверхности позволило установить следующие основные соотношения. Толщина верхнего слоя H , в котором возможны абсолютные разрежения, оценивается формулой

$$H = 2\pi f u_0 v_p / g.$$

Здесь f и u_0 — преобладающая частота и амплитуда смещений в продольной волне, g — ускорение свободного падения, v_p — скорость продольной волны в сжатой среде (т. е. то значение, которое мы обычно определяем из сейсмических наблюдений). Для 5–6-балльных землетрясений H не превышает одного метра, для 9–10-балльных — около 20–30 м. Отсюда ясно, что самая верхняя часть грунта (до ~ 30 м) играет наиболее существенную роль в формировании характера движений свободной поверхности.

В результате интерференции продольных падающих и отраженных волн вертикальные движения свободной поверхности рыхлого грунта имеют размах $2u_0 + u_0 v_{p(-)} / v_{p(+)} + u_0 v_{p(+)} / v_{p(-)}$, здесь $v_{p(-)}$ и $v_{p(+)}$ скорости продольных волн сжатия и разрежения (абсолютного).

Размах вертикальных движений в нерыхлом грунте — $4u_c$, отношение размахов в рыхлом и нерыхлом грунте

$$1/2 + 1/4 \cdot (v_{p(-)}/v_{p(+)} + v_{p(+)} / v_{p(-)}) > 1.$$

Это неравенство тем сильнее, чем больше $v_{p(-)}/v_{p(+)}$. Отсюда ясно, что рыхлые и особенно сыпучие грунты должны характеризоваться резким повышением сейсмического эффекта сильных землетрясений, если даже они представляют собой сравнительно тонкий слой, лежащий на нерыхлом основании.

Если считать, что увеличение сейсмического эффекта на рыхлых грунтах целиком объясняется описываемым явлением, и учесть связь между акустическими жесткостями грунтов и приращениями балльности, описываемую эмпирической формулой С. В. Медведева [2], то можно получить следующее соотношение между скоростями продольных волн сжатия и разрежения [4]:

$$v_{p(-)}/v_{p(+)} = -1 + 2\sqrt{5000/v_{p(-)}} + 2\sqrt{5000/v_{p(-)} - \sqrt{5000/v_{p(-)}}}.$$

Здесь принято, что при $v_{p(-)} = 5000$ м/сек $v_{p(+)} = v_{p(-)}$, т. е. при этом значении скорости продольных волн грунт нерыхлый.

Судя по тому, что в результате землетрясений на влажных грунтах наблюдаются большие разрушения, чем на идентичных сухих, можно прийти к выводу, что увлажнение сопутствует обычно увеличению рыхлости, т. е. модули упругости в сжатом и растянутом влажном грунте различаются сильнее, чем в сухом.

Обводненный грунт находится в несколько иных условиях, чем влажный и сухой, так как вода, заполняющая поры, нагружена атмосферным давлением. Поэтому даже у самой поверхности напряжения разрежения возможны лишь в тех случаях, когда относительные разрежения в интерференционном колебании, образованном падающей и отраженной от свободной поверхности продольными волнами, превзойдут одну атмосферу. Это значит, что амплитуда давления в падающей продольной волне должна быть значительно больше одной атмосферы. Таким образом, обводненный грунт даже при значительных деформациях ведет себя как нерыхлая среда. Тем не менее разрушения на обводненных грунтах, особенно типа лессов, глин, суглинков, характеризующихся очень низкими скоростями поперечных волн (около 300 м/сек), обычно значительно больше, чем на идентичных сухих. Это объясняется тем, что сухой грунт имеет существенно другие механические свойства. Можно, однако, предположить, что в тех грунтах, у которых скорость поперечных волн почти не уменьшается при увлажнении (галечники, песчано-гравийные отложения), сейсмический эффект окажется слабее, если уровень грунтовых вод находится у поверхности.

Нетрудно объяснить понижение сейсмического воздействия землетрясений, наблюдаемое в тех случаях, когда у поверхности лежит тонкий нерыхлый слой: этот слой нагружает своим весом рыхлую среду, в кото-

рой при иных обстоятельствах мог бы проявиться описываемый эффект увеличения амплитуды сейсмических колебаний. Из этих рассуждений следует также подтверждение известному факту, что большие массивные здания, стоящие на рыхлых грунтах, испытывают менее интенсивные колебания при сильном землетрясении, чем небольшие, легкие постройки [4].

Рыхлость—это одна из нескольких основных причин, определяющих характер колебания грунта во время землетрясения; чем сильнее деформации, тем больше вклад этой причины в динамические особенности колебаний грунта и сооружения. Экспериментальное изучение упругости рыхлых сред с целью последующего микросейсмического районирования целесообразно проводить с помощью интенсивных волн, возбужденных взрывами на сравнительно небольшой глубине—20—40 м. Чтобы получить количественные данные о различии упругих модулей при деформациях сжатия и растяжения, можно использовать следующие параметры движения поверхности вблизи источника.

1. Отношение между движением поверхности вверх и вниз в прямой продольной волне. Величина этого отношения растет с увеличением отличия модулей для деформаций различных знаков и может быть взята в качестве меры рыхлости. Наблюдения должны проводиться аппаратурой, регистрирующей смещения.

2. Присутствие постоянной составляющей в спектре колебаний прямой продольной волны вблизи источника. Если аппаратура настроена на регистрацию смещений, то постоянная составляющая—это алгебраическая сумма площадей, околтуренных графиком волны на сейсмограмме.

3. Соотношение между графиками изменения амплитуды прямой продольной волны с эпицентральной расстоянием. Если обозначить $A_{y, б}$ и $A_{y, м}$ — амплитуды прямой продольной волны в эпицентре (взрыва) и в некоторой удаленной точке, а индексами $б$ и $м$ отметить амплитуды, соответствующие большому и малому заряду, то величина

$$N = A_{y, б} / A_{y, м} : A_{y, б} / A_{y, м}$$

будет характеризовать особенности поведения грунта при воздействии интенсивных сейсмических волн. Для нерыхлого грунта эта величина будет равна примерно единице, так как отношение амплитуд прямых волн сравнительно мало изменяется с зарядом. В рыхлом грунте $A_{y, б} / A_{y, м} > A_{y, б} / A_{y, м}$, поэтому $N > 1$, в сыпучем $N \gg 1$; величина N , таким образом, является количественной мерой рыхлости грунта и может быть положена в основу микросейсмического районирования. Районирование путем применения взрывов в скважинах позволит изучить поведение грунта при больших сейсмических деформациях, т. е. в наиболее близких условиях к колебаниям при сильных землетрясениях. Отметим, что эти свойства грунта никак не могут быть обнаружены волнами малой деформации, обычно используемыми при сейсмическом изучении грунтов.

Количественные выражения рыхлости, полученные в результате изучения колебаний различных типов грунтов при больших деформациях,

могут быть прокоррелированы со скоростями ($v_p(-)$ и $v_s(-)$) и декрементами поглощения продольных и поперечных волн. Найденные закономерности позволят учитывать особенности колебаний поверхности рыхлого грунта, не исследованного волнами большой деформации.

Институт физики земли
АН СССР

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ляв А. Математическая теория упругости. М., ОНТИ, 1935.
2. Медведев С. В. Оценка сейсмической балльности в зависимости от грунтовых условий. Тр. Геофиз. ин-та АН СССР, № 14 (141), 1952.
3. Николаев А. В. Сейсмические свойства рыхлой среды. Изв. АН СССР. физ. Земли (в печати)
4. Сюэхиро К. Инженерная сейсмология. Изд. «Экономическая жизнь». М., 1935.