

Б. К. КАРАПЕТЯН

ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ НЕКОТОРЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В работе приводятся некоторые результаты исследования колебаний жилых, общественных и промышленных зданий и сооружений в натуре, возведенных из камня, железобетона (сборного или монолитного) и металла, основанных на различных грунтах (базальты, туфы, галечники, глины и суглинки-супеси).

Существующие аналитические выражения для определения периода свободных колебаний зданий и сооружений в большинстве случаев дают неточные его значения из-за условностей выбора расчетной схемы, а также вследствие допущений, принимаемых для облегчения расчета. Отсюда возникает необходимость динамические характеристики сооружений (периоды свободных колебаний и логарифмические декременты затухания) определять экспериментальным путем.

Экспериментальное определение периода свободных колебаний и логарифмического декремента затухания сооружений необходимо не только с точки зрения получения данных для расчета и проектирования, но и с целью осуществления их паспортизации. В результате последнего становится возможным рассматривать появившиеся при землетрясении повреждения в сооружениях, учитывая их динамические характеристики.

Изучение колебаний сооружений, кроме определения их периодов свободных колебаний и декрементов затухания, представляет интерес и для исследования ряда других, не менее важных для сейсмостойкости сооружений вопросов, как взаимодействие между фундаментом сооружения и его основанием (грунтом), нахождение ординат упругих линий, распределение сейсмических ускорений по высоте, определение относительных подвижек в наиболее ответственных узлах и соединениях и др. Для этой цели полезным является изучение колебаний опытных зданий путем предварительного размещения в них соответствующей аппаратуры, способной регистрировать колебания во время землетрясений. Осуществление подобных исследований связано с большими затруднениями: в первую очередь, из-за отсутствия возможности прогноза землетрясений во времени. Однако, несмотря на трудности, постановка подобных экспериментов крайне необходима. Относительно менее сложным является изучение поведения сооружений от других видов воздействия типа сейсмических, как-то: сейсмовзрывные колебания, промышленная вибрация, колебания от ветра, микросейсмы и др.

Данные относительно периодов колебаний некоторых зданий в Японии, измеренных до и после землетрясений, приведены у К. Сюэхиро [1]. Ф. Улрих и Д. Кардер, описывая результаты как своих исследований, так и работ других авторов, проводивших такие измерения в США, приводят обширные данные по исследованию колебаний зданий и сооружений в основном от воздействия ветра [2]. Исследование четырехэтажно-

го железобетонного здания при вынужденных колебаниях, генерируемых вибромашиной, было произведено И. Алфордом и Г. Хаузнером [3]. Поведение зданий при колебаниях почвы, вызванных ветром, было изучено Д. Гудзоном, И. Алфордом и Г. Хаузнером [4]. В СССР известны исследования И. Л. Корчинского по изучению колебаний высотных зданий [5], работы А. З. Каца и С. В. Пучкова по исследованию колебаний зданий от взрыва [6], Е. И. Бакрадзе; В. С. Павлыка по определению параметров колебаний зданий по микросейсмам [7, 8], С. В. Медведева по изучению колебаний сооружений по методу МИКС, при различных источниках сейсмического возбуждения [9, 10], Р. С. Шусера по изучению колебаний зданий под воздействием взрывов [11] и др.

Нами изучались колебания жилых общественных и промышленных зданий и сооружений (около 70 объектов), возведенных из камня, железобетона (сборного или монолитного) и металла, основанных на различных грунтах (базальты, туфы, галечники, коренные глины, суглинки-супеси). Колебания вызывались взрывами или микросейсмами. Запись осуществлялась с помощью передвижной сейсмической лаборатории, оснащенной соответствующей сейсмоизмерительной аппаратурой.

Приводим лишь некоторые результаты исследования.

При взрывах наиболее полные данные получены для трехэтажного жилого дома — каменного здания размерами в плане $54,9 \times 12,5$ м, основанием которого служили мощные базальты. При этом были осуществлены три взрыва с сейсмическим эффектом до V баллов. Измерения производились как в грунте, так и в здании. Измерялись деформации в здании, смещения, скорости, ускорения и приведенные ускорения в грунте и здании. Запись колебаний производилась с помощью двух осциллографов. Помимо этого производилась регистрация колебаний с помощью трех сейсмометров АИС-2.

Полученные при этом взрыве записи колебаний были табулированы и переданы в Вычислительный центр АН Армянской ССР для определения спектрального состава колебаний на грунте и в здании на различной высоте. Колебания представлялись интегралом Фурье по методике, разработанной Н. К. Карапетян [12], и определялись спектральные плотности по амплитуде — $\Phi(\omega)$ и начальной фазе $\phi(\omega)$.

В результате анализа полученных данных можно заключить, что преобладающая частота колебаний грунта равна 12—14 герц. Такая же частота колебаний была получена при производстве большого количества взрывов при изучении сейсмического режима этого участка. Таким образом, эту частоту колебаний, видимо, можно приписать данному участку. Частота свободных колебаний здания оказалась равной 5,4 герца. Частоты колебаний здания в обоих взаимно-перпендикулярных направлениях при замере смещений, скоростей и ускорений практически получились одинаковыми как при разных взрывах, произведенных в перпендикулярных направлениях, так и при одних и тех же взрывах, замеренных в этих же перпендикулярных направлениях. Однаковые частоты колебаний здания получились также при замере деформаций во взаимно-перпендикулярных стенах. Все это говорит о том, что при колебании здания преобладающими являлись деформации сдвига. Логарифмический декремент затухания здания в среднем оказался равным $\delta = 0,32$.

Из-за взаимодействия между фундаментом здания и его основанием, в здании произошло существенное уменьшение (по сравнению с грунтом) как величин смещений (до 4 раз), так и ускорений и приведенных ускорений (до 1,9 раза).

Исследование жилых зданий нами, в основном, осуществлялось с помощью микросейсмических колебаний. Было экспериментально изучено около 40 зданий, имеющих различные конструктивные решения, этажности и основанных на различных грунтах. Наиболее полные данные получены по зданиям, имеющим каменные несущие стены системы «мидис» (27 зданий), ввиду того, что строительство в республике в основном пока еще ведется из кладки такой системы. Были изучены также 7 крупнопанельных зданий, 4—из камней правильной формы, 1—из составных каменных блоков, 2—из естественных каменных блоков. В зданиях, в основном, перекрытиями являлись сборные пустотелые железобетонные балки—настилы; чердачные перекрытия были сделаны из сборных ферм-настилов, а иногда из дерева.

Для всех исследованных зданий (высотой от 1 до 10 этажей) найдены величины частоты основного тона свободных колебаний.

По величинам полученных частот колебаний, имея также размеры зданий в плане и их высоты, мы сочли возможным представить величину периода колебаний (основного тона) в зависимости от наименьшего размера здания — b , высоты — H и некоторого коэффициента — k , который, в основном, зависит от грунта в основании здания, а также от вида несущих конструкций.

Эта формула выглядит следующим образом:

$$T_1 = k \frac{H}{\sqrt{b}}.$$

Для зданий с несущими каменными стенами системы «мидис» мы имели возможность определить величины коэффициента k для различных грунтов основания, значения которого вполне закономерны, а именно: чем жестче грунт, тем большая получается частота колебаний здания. По другим зданиям такой возможности получения значений коэффициента k для всех указанных разновидностей грунтов не имелось.

На основании полученных данных мы рекомендуем средние значения коэффициента k , приведенные в табл. 1.

Таблица 1

| Грунт основания | Несущие стены | | | | |
|---------------------------|---------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------|
| | Мидис* | Камни правильной формы | Естеств. каменные блоки | Составные каменные блоки | Крупные панели |
| Базальты | 0,050 | 0,055 | 0,050 | 0,060 | — |
| Сцементированные гальчики | 0,055 | 0,060 | — | — | 0,040 |
| Туфы | 0,060 | — | — | — | — |
| Коренные глины | 0,065 | — | — | — | — |
| Суглинки-супеси | 0,075 | 0,080 | — | — | — |

По полученным записям колебаний на разных по высоте уровнях здания имелась возможность построить упругие линии колебаний большинства исследованных зданий.

На записях колебаний некоторых зданий удалось обнаружить кроме основного тона колебаний также второй тон, который для каменных зданий высотой 4—6 этажей приближенно можно определить по формуле:

$$T_2 = \frac{1}{3} T_1.$$

Во всех изученных зданиях колебания замерялись в двух взаимно-перпендикулярных направлениях (вдоль стен). В большинстве случаев (в невысоких зданиях) их частота колебаний в обоих направлениях получалась одинаковой.

Запись колебаний на грунте и в здании на том же уровне была разной по амплитуде и частоте, что следует объяснить как результат взаимодействия между фундаментом здания и его основанием.

Частоты и амплитуды колебаний грунта в непосредственной близости от здания и на некотором расстоянии от него (20—25 м) сильно отличались. Это являлось результатом того, что на колебания грунта в непосредственной близости от здания накладывались дополнительные колебания от него, т. е. сказывалось обратное действие здания на грунт, в результате чего создавалось вторичное поле колебаний [13, 14].

Приведем данные по одному из изученных нами промышленных объектов.

В момент первоначального испытания сооружение было далеко не завершенным. Оно представляло собою двухпролетную многоярусную сборную железобетонную конструкцию, состоящую из 7 рядов колонн, по которым были установлены прогоны, причем по длине сооружения в одном конце колонны были свободно стоящими, второй ряд колонн с помощью прогонов соединялся со следующим рядом только с одной стороны, остальные колонны имели двухстороннюю связь. Изучению были подвергнуты три колонны: № 1—свободно стоящая; № 2—с односторонней связью и № 3—с двухсторонней связью. Частота колебаний колонны № 1 оказалась равной 0,8 герц, № 2—3,6 герца, № 3—13 герц.

Объект в завершенном виде представляет собой шестиярусную сборную железобетонную конструкцию (этажерку), на перекрытиях которой установлено оборудование (примерно 100 т на каждое перекрытие). Сооружение имеет 6 пролетов по длине и 2 пролета по ширине. На самом верхнем ярусе работает мостовой кран для подъема оборудования. Основанием несущих элементов сооружения служат галечники.

Вначале было проведено испытание при движении мостового крана и его торможении, что производилось с целью получения затухающих колебаний сооружения, для определения его логарифмического декремента затухания. При этом замеры колебаний осуществлялись вдоль большого размера сооружения по направлению движения мостового крана, в двух точках (на втором и шестом ярусах). При движении мостового крана частоты колебаний получились равными: в верхнем ярусе 0,7 и 1,6 герца, а в нижнем — 1,6 герца. При торможении крана частота колебаний как во втором, так и в шестом ярусах получилась равной 1,6 герца. При этом была получена запись затухающих свободных колебаний. По этой записи был определен логарифмический декремент затухания $\delta = 0,3$.

При колебании сооружения от микросейсм частота вдоль меньшей жесткости получилась равной 0,75 герца, с наложением частоты 2,8 герца, а вдоль большей жесткости частота колебаний оказалась равной 0,9 герца, с наложением 3,3 герца. Таким образом, частоты колебаний в двух взаимно-перпендикулярных направлениях сооружения (вдоль линии колонн) получились явно разными. При этом обнаружена вторая форма колебаний (по величине и по фазе), отличная для разных направлений.

Проведено также исследование по определению безопасного с точки зрения сейсмического воздействия количества единовременно взрываемого заряда на участке строительства аппаратно-студийного корпуса Ереванского телевизионного центра.

Наиболее ответственным сооружением действующего телекоммуникационного центра является металлическая телевизионная башня (с фидерами) высотой 180 м, построенная по типовому проекту для второго ветрового района. Она опирается на четыре железобетонных фундамента, заглубленных уступами на глубину 4,1 м от поверхности, имеющих размеры в основании $5,4 \times 5,4$ м. Грунтами основания служат базальты.

Перед тем, как приступить к исследованию колебаний башни от взрывов, производимых поблизости от нее, были изучены собственные колебания башни (с фидером). С этой целью на башне и на фидере в различных точках по высоте, а также на верхнем обрезе фундаментов башни были установлены чувствительные измерительные приборы и по записи колебаний от микросейсм определялись для них амплитуды отклонений, упругие линии и периоды собственных колебаний. На башне на высоте 0 (фундамент башни), 24 и 56 м замерялись смещения и ускорения, а на фидере — деформации (у колена и на высоте 24 м от поверхности грунта).

По произведенным записям определены три тона свободных поперечных колебаний башни, соответственно равные: 1,3; 0,5 и 0,2 сек. Период поперечных колебаний фундаментов равнялся 0,07 сек. Период продольных колебаний фидера — 0,07 сек. Прогиб конца башни, найденный приблизительно по величине смещений от микросейсм, в различных точках по высоте находился в пределах 7 мм. Напряжения в фидере получились незначительные.

Далее был замерен взрыв, произведенный в 88 шпурах, имеющих глубину 50 см, с общим количеством заряда 22 кг, на расстоянии порядка 80 м от телевизионной башни. Приборы были установлены примерно в таких же положениях, как при замере колебаний от микросейсм.

Колебания фундамента башни происходили с периодом 0,1 и 0,05 сек., при амплитуде 0,015 мм. Ускорение фундамента получилось равным порядка 50 мм/сек².

Максимальное отклонение верха башни от взрыва, по сравнению с замеренными микросейсмами, увеличилось примерно в три раза, т. е. ориентировочно прогиб башни можно принять равным 2 см. Допустимый максимальный прогиб башни, в соответствии с данными телекоммуникационного центра, равняется 13 см. Таким образом, полученный при взрыве прогиб 2 см находится в пределах допустимого. При таком замеренном при взрыве прогибе естественно, что в фидере не должны возникать напряжения, опасные для его сохранности.

При изучении колебаний зданий и сооружений производились взрывы, которые на территории одного из объектов были также использованы с целью апробации сейсмометров АИС-2М в полевых условиях. На теории многомаятниковых сейсмометров, на полученных с их помощью данных, а также на результатах проведенных замеров сейсмометрами АИС-2М, не будем останавливаться [15, 16, 17]. Отметим лишь, что сейсмометры АИС-2М оправдывают свое назначение в качестве приборов для записи сейсмических колебаний при сильных землетрясениях и взрывах.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Сюэхиро. Инженерная сейсмология, Изд-во «Экономическая жизнь», М., 1935.
2. F. P. Ulrich and D. S. Carder. Vibration of Structures, Proceedings of the Symposium on Earthquake and Blast Effects of Structures, Los Angeles, California, June, 1952.
3. I. L. Alford, and G. W. Housner. Dynamic Tests of Four-Story Reinforced Concrete Building, Bulletin of the Seismological Society of America, 1953, Vol. 43, № 1.

4. D. E. Hudson, I. L. Alford and G. W. Housner. Measured Response of a Structure to an Explosive Generated Ground Shock, Bulletin of the Seismological Society of America, 1954, Vol. 44, № 4.
5. И. Л. Корчинский. Колебания высотных зданий. Научное сообщение, вып. 11, М., 1953.
6. А. З. Кац, С. В. Пучков. К вопросу о колебаниях зданий от взрыва. Тр. Геофизического ин-та АН СССР, № 9 (136), М.—Л., 1950.
7. Е. И. Бакрадзе. Экспериментальное определение параметров колебаний ряда жилых зданий. Тр. Ин-та строительного дела АН Груз. ССР, т. VII, 1959.
8. В. С. Павлык. Определение свободных колебаний зданий с несущими стенами. Исследование по сейсмостойкости зданий и сооружений, М., 1960.
9. С. В. Медведев. Экспериментальные исследования колебаний жестких сооружений при сейсмических воздействиях. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, № 1 (168), М., 1958.
10. С. В. Медведев. Исследования колебаний зданий при сейсмических воздействиях. Тр. Ин-та физики Земли, № 5, М., 1959.
11. Р. С. Шусер. Экспериментальное определение периодов и декрементов затухания собственных колебаний зданий. Тр. Ин-та сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Тадж. ССР, т. VIII, 1960.
12. Н. К. Карапетян. Методика определения спектра с учетом непериодичности сейсмических колебаний. Докл. АН Арм. ССР, т. XXXIV, № 2, 1962.
13. Б. К. Карапетян. Изучение поведения сооружений при сейсмических воздействиях. Докл. АН Арм. ССР, т. XXXI, № 5, 1960.
14. Б. К. Карапетян. Результаты экспериментального исследования колебаний характерных зданий г. Еревана. Изв. АН Арм. ССР (технические науки), т. XIV, № 5, 1961.
15. А. Г. Назаров. Метод инженерного анализа сейсмических сил, Изд-во АН Арм. ССР, Ереван, 1959.
16. Б. К. Карапетян. Многомаятниковые сейсмометры и результаты их применения в инженерной сейсмологии, Армгосиздат, Ереван, 1963.
17. Б. К. Карапетян, Г. А. Мароян, Г. С. Туманов. Опыт применения сейсмометров АИС-2М при взрывах. Изв. АН Арм. ССР (техн. науки), т. XVI, № 1, 1963.

Институт геофизики и инженерной сейсмологии АН Армянской ССР.