

ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ

Б. К. Карапетян

Изучение поведения сооружений при сейсмических
воздействиях

(Представлено академиком АН Армянской ССР А. Г. Назаровым 22 III 1960)

При расчете сооружений на сейсмическую нагрузку, наряду с ошибками вследствие приближенного представления сейсмической нагрузки и принимаемых расчетных схем, некоторые ошибки могут возникнуть в результате аналитического определения динамических характеристик сооружений. Отсюда возникает необходимость динамические характеристики (периоды свободных колебаний и логарифмические декременты затухания) определять экспериментальным путем.

Экспериментальное определение периодов свободных колебаний и логарифмических декрементов затухания сооружений необходимо не только с точки зрения получения данных для производства расчета и проектирования, но и с целью осуществления их паспортизации. Это позволяет 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 в этажах, определение относительных подвижек в наиболее ответственных узлах и соединениях и др. Для этой цели очень полезным является изучение колебаний опытных зданий путем предварительного размещения в них соответствующей аппаратуры, способной регистрировать колебания зданий во время землетрясений. Осуществление подобных исследований связано с большими затруднениями и, в первую очередь, из-за отсутствия возможности прогноза землетрясения во времени. Однако, несмотря на трудности, постановка подобных экспериментов крайне необходима. Относительно менее сложным является изучение пове-

дения сооружений от других видов воздействий типа сейсмических, как-то: сейсмозрывные колебания, промышленная вибрация, колебания от ветра, микросейсмы и др.

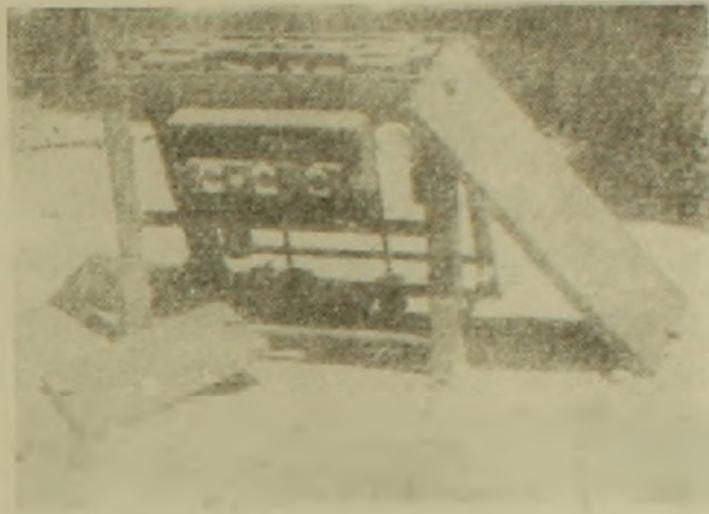
Данные относительно периодов колебаний некоторых зданий в Японии, измеренных до и после землетрясений, приведены у К. Сюэхиро (1). Ф. Улрих и Д. Кардер, описывая результаты как своих исследований, так и работ других авторов, проводивших такие измерения в США, приводят обширные данные по исследованию колебаний зданий и сооружений в основном от воздействия ветра (2). Исследование четырехэтажного железобетонного здания при вынужденных колебаниях, генерируемых вибромашиной, было произведено И. Алфордом и Г. Хаузнером (3). Поведение зданий, при колебаниях почвы, вызванных взрывом, 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. Кац и С. В. Пучкова по исследованию колебаний зданий от взрыва (6), Е. И. Бакрадзе по определению параметров колебаний зданий по микросейсмам (7), С. В. Медведева по изучению колебаний жестких сооружений по методу МИКС, при различных источниках сейсмического возбуждения (8) и др.

Разработанная нами методика изучения поведения сооружений при сейсмических воздействиях отличается от применяемого в Институте физики Земли АН СССР метода многоканального исследования колебаний сооружений (МИКС) тем, что помимо вибрографов ВЭГИК, осциллографов ПОБ-12 и гальванометров ГБ-III и ГБ-IV, которые являются основными приборами при МИКС, мы пользуемся также сейсмоприемниками СПМ-16 для записи скоростей и ускорений в здании и на грунте, тензометрическими датчиками для измерения деформаций в здании и сейсмометрами АИС-2 для записи приведенных сейсмических ускорений в здании и на грунте. В результате создается возможность более полного изучения поведения сооружений при колебаниях и, что особенно существенно, в первую очередь исследования взаимодействия между фундаментом сооружения и его основанием (грунтом), учет которого может привести к существенному уменьшению сейсмической нагрузки, действующей на сооружения.

Были изучены колебания 16 зданий, основанных на различных грунтах. Здания имели различные конструктивные схемы и разную этажность. Колебания в 4 зданиях возбуждались путем осуществления взрывов поблизости от них, при различных количествах взрывчатого вещества и способах взрывания.

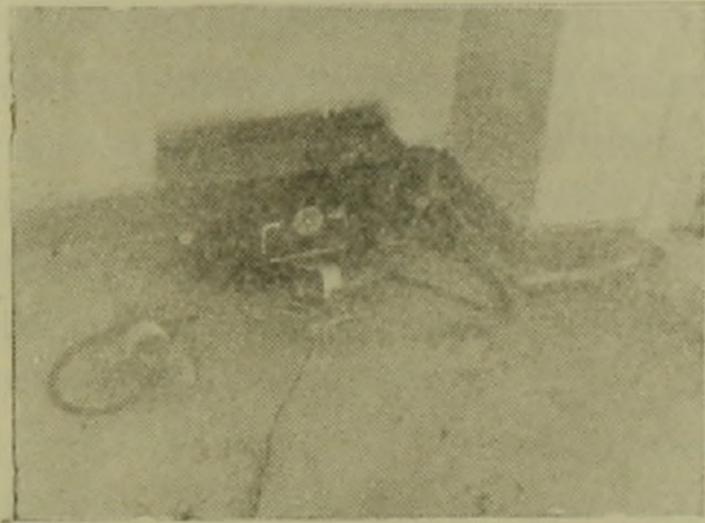
Наиболее полные данные получены в результате исследования трехэтажного жилого дома—каменного здания размерами в плане $54,9 \times 12,5$ м, основанного на белоземе, подстилаемом мощным слоем базальтов. При этом были замерены три взрыва. Первый взрыв был осуществлен на расстоянии 30 м от торцевой стены в 3 скважинах при количестве взрывчатки $3 \times 20 = 60$ кг; второй и третий взрывы

были произведены с фасадной стороны здания, ближе к его углу, в одиночных скважинах, при количестве взрывчатки соответственно 25 и 20 кг. Сейсмический эффект при первом взрыве можно оценить примерно 5 баллов. Измерения производились как в грунте, так и в здании. Измерялись деформации в здании, смещения, скорости, ускорения и приведенные сейсмические ускорения в грунте и в здании. Приборы были установлены следующим образом. На грунте были расположены два сейсмометра, один из которых находился вблизи от здания (фиг. 1). В непосредственной близости от него были установлены ВЭГИК и СПМ-16 для записи смещений, скоростей и ускорений. В здании был установлен один сейсмометр в оконном проеме подвала (на уровне поверхности грунта). Рядом были расположены ВЭГИК и СПМ-16 для записи смещений, и ускорений. На стене, на высоте 150 см от пола 1 этажа, на базе 50 мм был установлен тензометрический датчик для измерения деформаций в шве кладки.



Фиг. 1.

Далее, в здании ВЭГИК и СПМ-16 были установлены на лестничных площадках, в основном, ближайшей от места взрыва лестничной клетки (на уровне междуэтажных перекрытий) и на чердачном перекрытии в углах примыкания капитальных стен (фиг. 2).



Фиг. 2.

На 1 этаже был установлен только СПМ-16 для измерения скорости колебаний. Причем при 1 взрыве СПМ-16, измеряющий скорость, был установлен также в другой лестничной клетке, опять-таки на 1 этаже, с целью получения разницы во времени начала колебаний, для определения величины скорости распространения сейсмических волн в здании.

На 2 этаже и на чердачном перекрытии при всех взрывах были установлены ВЭГИК и СПМ-16 для записи смещений и ускорений.

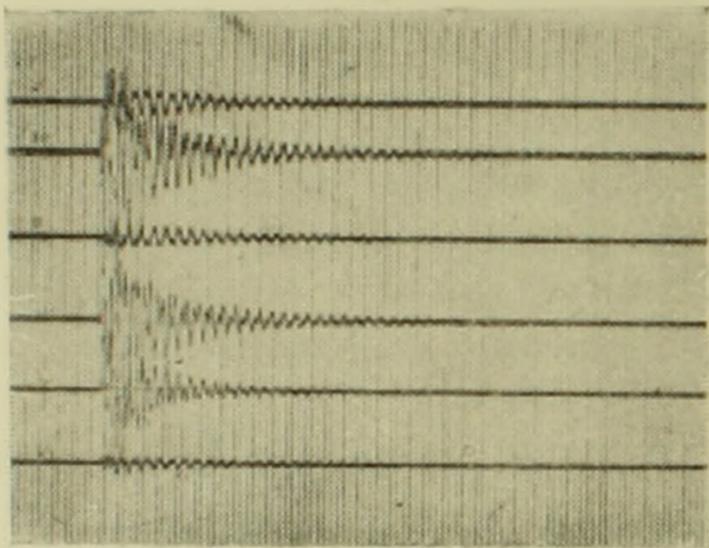
На 3 этаже при первом взрыве были установлены ВЭГИК и СПМ-16 для получения смещений и ускорений, а при втором взрыве ВЭГИК и два перпендикулярно друг к другу расположенных СПМ-16 для записи скорости, с целью определения периода колебаний здания в двух перпендикулярных направлениях.

Регистрация колебаний производилась в одной из комнат здания, специально приспособленной для этой цели, с помощью двух осциллографов ПОб-12, установленных на пружинящей подставке, обеспечивающей нормальную их работу. Пример записи, полученной на одном из осциллографов, приведен на фиг. 3.

Таким образом, при каждом взрыве получалась одновременная запись отдельных параметров колебаний с помощью 17 приборов, в том числе 3 сейсмометров.

На основании анализа произведенных записей получены следующие результаты.

Преобладающая частота колебаний почвы при взрывах получилась примерно равной 12—14 герц. Такая же частота колебаний была получена при производстве большого количества взрывов (от самых слабых и до достаточно сильных) при изучении сейсмического



Фиг. 3

режима этого участка. Таким образом, эту частоту колебаний, видимо, можно приписать данному участку. Частоты колебаний в здании в оконном проеме подвала (на уровне поверхности грунта) и на уровне пола 1 этажа (расположенного на высоте примерно 1,0 м от поверхности грунта) получились равными порядка 12—14 герц с наложением частоты в 5,4 герц, на уровне пола 2 и 3 этажей и чердачного

перекрытия частота колебаний равнялась 5,4 герц. Таким образом, основную частоту свободных колебаний здания следует считать равной 5,4 герц или $T=0,185$ сек. Полученные в здании (в точках, находящихся ближе от поверхности грунта) частоты в 12—14 герц следует приписать частоте, передающейся от грунта, но возможно и второго тона собственных колебаний здания. С этой точки зрения представляется более правильным для определения основного периода свободных колебаний сооружения замеры производить в верхних его частях. Частоты колебаний здания в обоих взаимно-перпендикулярных направлениях (по направлению стен), 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 направлениях. Одинаковые частоты колебаний здания получились также при замере деформаций во взаимно-перпендикулярных стенах. Величины деформаций при этом получились сравнимыми (в смысле их одинаковости при приведении к одному и тому же количеству заряда). Все это говорит о том, что при колебании здания преобладающими являлись деформации сдвига. Однако, с другой стороны, построенные по величинам максимальных смещений деформированные оси при I, при II

и III взрывах получились несколько отличными. Скорость распространения сейсмозвонной волны в здании равнялась 617 м/сек, а длина волны—20,6 м. Логарифмический декремент затухания здания в среднем оказался равным $\delta = 0,32$.

Распределение ускорений в здании получилось разным при каждом взрыве. Если сравнить ускорения в здании на уровне поверхности грунта и чердачного перекрытия, то замечаем следующее: при I взрыве происходит увеличение сейсмического ускорения в 1,9 раза, при 2 взрыве—1,7 раза, при 3 взрыве—1,4 раза.

Относительная деформация кладки при I взрыве получилась равной $\varepsilon = 0,8 \cdot 10^{-4}$.

Из-за взаимодействия между фундаментом сооружения и его основанием в здании происходит существенное уменьшение (по сравнению с грунтом) как величин смещений, так и ускорений и приведенных ускорений (соответствующих периоду 0,2 сек, что ближе к периоду здания). Например, по данным I взрыва получилось, что в здании ускорение уменьшается в 1,9 раза, приведенное ускорение—1,85 раза, смещение—4 раза. При этом интересно, что в здании уменьшение величин ускорений и приведенных ускорений (для $T = 0,2$ сек) получилось примерно одинаковым.

При исследовании остальных 12 зданий по микросейсмическим колебаниям, запись производилась с помощью ВЭГИК и СПМ—16, которые устанавливались в здании на уровне перекрытий каждого этажа, в основном на лестничных площадках, а также на грунте, на различных расстояниях от здания. Приборы устанавливались в двух взаимно-перпендикулярных положениях для записи колебаний здания вдоль направления стен. В результате получены следующие предварительные данные.

Построенные упругие линии при колебаниях зданий от микросейсм имеют вид либо прямой линии (случай поворота здания вокруг оси, проходящей через подошву фундамента), либо изогнутой линии от сдвиговых деформаций.

При микросейсмических колебаниях зданий обнаруживается, кроме основного тона колебаний, также второй тон. Эту частоту колебаний можно приписать и „собственной“ частоте колебаний грунта, которая часто близка к ней. Однако мы склонны считать, что это есть также второй тон колебаний здания, вызываемый вследствие резонанса с частотой колебаний грунта (на записи часто получаются биения). При том такая частота в здании наблюдается и после прекращения колебаний грунта от взрыва*.

Колебания грунта и здания на том же уровне получают существенно разнящимися, в основном по величине амплитуды колебаний

* К моменту выхода в свет настоящей работы нами были исследованы еще 24 здания, в результате чего с большей достоверностью получена вторая частота колебаний высоких зданий, а также установлены некоторые другие закономерности.

(в здании амплитуда колебаний меньше), что следует объяснить влиянием фактора взаимодействия между фундаментом здания и его основанием (грунтом).

Частоты и амплитуды колебаний грунта в непосредственной близости от здания и на некотором расстоянии от него (20—25 м) сильно отличаются. Это является результатом того, что на колебания грунта в непосредственной близости от здания накладываются дополнительные колебания от здания, т. е. сказывается обратное действие на грунт здания, в результате чего создается вторичное поле колебаний.

Собственные колебания одноэтажного здания с подвалом, основанного на увлажненных супесчано-суглинистых грунтах, имеют очень низкую частоту (2,8 герц); при этом обнаруживается также и второй тон колебаний (7,2). В этом случае (жесткого сооружения на податливом основании), вероятно, частота колебаний здания в основном определяется частотой колебаний грунта.

Частота колебаний крупно-панельных зданий получается выше, по сравнению с каменными. В случае крупно-панельных зданий, по-видимому, сказывается несравненно меньшая высота здания и этажей, а также более жесткая связь в углах и примыканиях стен.

Институт строительных материалов и сооружений
Госстроя Армянской ССР

Բ. Կ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

Կառուցվածքների ուսումնասիրությունը սեյսմիկ ուժերի ազդեցության դեպքում

Առաջարկվում է կառուցվածքների ուսումնասիրություն մի մեթոդ, որը հնարավորություն է ընձեռնում որոշելու կառուցվածքի զինամիկական հատկությունները և հետազոտելու կառուցվածքի հիմքի ու նրա հիմնատակի փոխազդեցությունը: Վերջինը կարևոր է հատկապես այն պատճառով, որ դա հաշվի առնելու դեպքում շենքի հաշվարկը կատարելիս հնարավորություն է ստեղծվում սեյսմիկական ուժերն զգալիորեն փոքրացնելու:

Նշված մեթոդի կիրառմամբ կատարված է սեյսմիկ զոնություն ունեցող 16 շենքերի փորձնական ուսումնասիրություն: 3 շենքերի տատանումները առաջ են բերվել պայթեցումների օգնությամբ, որոնցից մեկի՝ քարե եռահարկ բնակելի շենքի փորձարկման արդյունքները բերվում են սույն հոդվածում: Այդ փորձերի ընթացքում միաժամանակյա գրանցում է կատարվել 17 չափիչ գործիքներով: Գրանցման են ենթարկվել շենքի զեֆորմացիաները, գետնի և շենքի տեղափոխումները, արագությունները, արագացումները, ինչպես և բերված արագացումները:

Ստացված արդյունքները թույլ են տալիս հանդելու հետևյալ եզրակացությունների.

1. Գետնի տատանումների զերակշռող հաճախականությունը հավասար է 12—14 հերցի:
2. Շենքի հիմնական սեփական հաճախականությունը հավասար է 5.4 հերցի:
3. Շենքի հաճախականությունները փոխազդահայաց ուղղություններում իրար հավասար են: Սա ցույց է տալիս, որ տատանումների ժամանակ զերակշռողը սահքի զեֆորմացիաներն են:
4. Պայթեցումից առաջացած սեյսմիկական ալիքների տարածման արագությունը հավասար է 617 մ/վայրկ., իսկ ալիքի երկարությունը՝ 20,6 մ:
5. Շենքի միջին յոդարիթմական դեկրեմենտը ստացվել է $\delta = 0,32$:
6. Արագացումների բաշխումը ըստ շենքի բարձրության ստացվել է տարբեր: Արագացումների համեմատությունը շենքում, գետնի մակերեսի և նկուղային ծածկի հար-

Քուժյուղներում պուլյ է տալիս, որ I պայթեցման ժամանակ ստացվել է սեյսմիկ արագացման մեծացում 1,9 անգամ, II պայթեցումից — 1,7 անգամ, III պայթեցումից — 1,4 անգամ:

7. Շարվածքի հարարերական դեֆորմացիան I պայթեցման ժամանակ ստացվել է $\varepsilon = 0,8 \cdot 10^{-4}$:

8. Շենքում նրա հիմքի և հիմնատակի փոխադրման հետևանքով ստացվում է տեղափոխումների, արագացումների և բերված արագացումների արժեքների պայթի նվազում: Օրինակ՝ I պայթեցման ժամանակ այդ իսկ պատճառով տեղափոխումները շենքում գրունտի հետ համեմատած նվազել են 4 անգամ, արագացումները — 1,9 անգամ և բերված արագացումները, որի 5 հերցին համապատասխանող արժեքը մոտ է շենքի սեփական տատանումների հաճախականությանը՝ 1,85 անգամ:

Միկրոսեյսմիկ տատանումների օգնությամբ 12 շենքերի ուսումնասիրությունից ստացված են նախնական մի շարք տրոյունքներ՝ շենքի տատանման առանձգական դժի, շենքի տատանման երկրորդ տոնի, զետնի և շենքի տատանման տարրերության, ինչպես և մի քանի այլ բնութագրող հարարերություններ:

ЛИТЕРАТУРА — Գ Ր Ա Վ Ա Ն Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

¹ К. Сюэхира, Инженерная сейсмология, Издательство „Экономическая жизнь“, М., 1935. ² Ф. П. Улрих и Д. С. Кардер, Vibration of Structures, Proceedings of the Symposium on Earthquake and Blast Effects of Structures, Los Angeles, California June, 1952. ³ И. Л. Алфорд и Г. В. Хаузнер, A Dynamic Tests of Four-Story Reinforced Concrete Building, Bulletin of the Seismological Society of America, 1953, Vol. 43, № 1. ⁴ Л. И. Гудзон, У. Л. Алфорд и Г. В. Хаузнер, Measured Responce 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 М., 1953, вып. II. ⁶ А. З. Кац и С. В. Пучков, К вопросу о колебаниях зданий от взрыва, Труды Геофизического института АН СССР, М.-Л., 1950 № 9 (136). ⁷ Е. И. Бакрадзе, Экспериментальное определение параметров колебаний ряда жилых зданий, Труды Института строительного дела АН Грузинской ССР, 1959, т VII. ⁸ С. В. Медведев, Экспериментальные исследования колебаний жестких сооружений при сейсмических воздействиях, Труды Института физики Земли АН СССР, М., 1958, №1 (168).

