

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ПРИ
ИССЛЕДОВАНИИ МОДЕЛЕЙ СООРУЖЕНИЙ НА
СЕЙСМОВЗРЫВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Экспериментальное изучение поведения сооружений с помощью сейсмозрывных воздействий широко используется в практике исследования сейсмостойкости гражданских и промышленных сооружений. Систематические исследования в этом направлении в последние годы ведутся в ТИССС АН Таджикской ССР и в ВНИИВОДГЕО. Однако в этих работах исследователи стремятся с помощью взрывов не моделировать, а имитировать землетрясения соответствующей интенсивности и спектральным составом колебания грунта, поскольку объектами исследования являются натурные здания и сооружения.

Исследования в этом направлении, которые проводятся в ИГИС АН АрмССР, отличаются от других тем, что в этом случае землетрясения полностью моделируются как по своему спектральному составу, так и по длительности воздействий, поскольку объектами исследования являются не натурные сооружения, а их модели. Начало этих исследований было положено в работах [4, 5], выполненных под руководством А. Г. Назарова на основе теории расширенного подобия твердых деформируемых тел [3]. Основной трудностью при этих исследованиях является точное моделирование колебания почвы в соответствии с условиями подобия.

В настоящей работе обосновывается метод осуществления моделирования сейсмического воздействия сейсмозрывными волнами на основе статистического подобия [1]. Сущность этого метода заключается в следующем.

Критерий подобия выводится из условия, что приведенные сейсмические ускорения для модели $\tau'(T')$ и оригинала $\tau(T)$ при фиксированных значениях затухания должны находится в том же соотношении, что и ускорения рассматриваемых систем. Если сооружение моделируется в естественном гравитационном поле, то спектры приведенных сейсмических ускорений колебания грунта модели и оригинала должны совпадать с точностью множителя подобия для времени ξ , т.е. должно выполняться условие:

$$\tau'(\xi T) = \tau(T), \quad (1)$$

где $\xi = T'/T$. T' и T — периоды собственных колебаний соответственно модели и оригинала.

Добиться выполнения этого условия путем регулирования параметров взрыва — крайне трудная задача. Однако в этом случае имеется компромиссный вариант. Если совпадение спектров приведенных ускорений не достигается при данных грунтовых условиях, то путем регулирования количества взрывчатого вещества достигается равенство

только ускорений грунта при землетрясении и взрыва. Что касается временного фактора, то его можно оценить путем вычисления из условия минимума квадрата разностей спектров приведенных сейсмических ускорений при взрыве и моделируемом землетрясении:

$$|\tau'(T) - \tau(T)|^2 = \min. \quad (2)$$

После вычисления из условия (2) значения множителя подобия для времени ξ определяются оптимальные значения множителей подобия для всех остальных механических величин, тем самым обеспечивая полное подобие модели и оригинала.

В качестве конкретного примера приводятся исследования на сейсмозрывные воздействия сложной пространственной железобетонной конструкции, спроектированной для территории, сейсмичность которой оценена сейсмологами в шесть баллов. Основной задачей проведенных исследований являлось изучение закономерности изменения сейсмических ускорений по разным уровням испытуемого сооружения и построение поэтажных спектров реакции — «спектров откликов» [2].

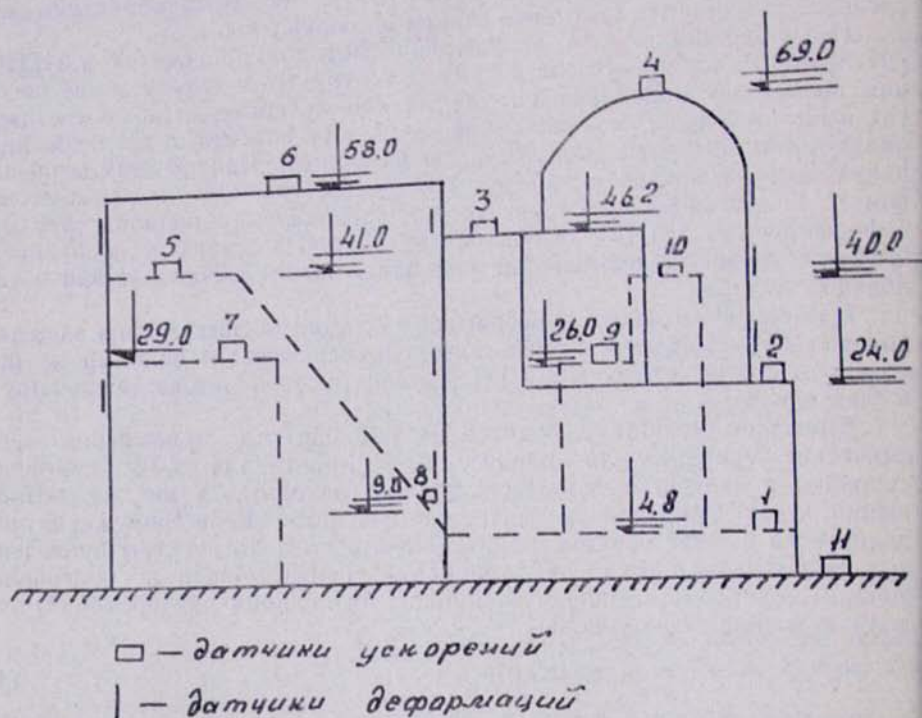


Рис. 1. Схематический вид сооружения

Здание спроектировано как симметрично жесткое сооружение на единой фундаментной коробчатой конструкции, размером в плане 66×66 м с размещением центра нагрузок конструкций в геометрическом центре здания. Схематический вид сооружения с указанием на нем отметок установки приборов показан на рис. 1. Анализ показал, что моделирование сооружений необходимо выполнять на базе теории расширенного подобия твердых деформируемых тел, поскольку осуществле-

ние дополнительной пригрузки, компенсирующей собственный вес такой сложной конструкции, практически невозможно.

Экспериментальные исследования предусматривалось проводить на участке территории Гюлбулахского каменного карьера Амасийского района Армянской ССР. На основании пробуренных скважин глубиной 16 м установлено, что грунты на территории участка разделяются на два слоя. Верхний слой мощностью 8-9 м — туфы вулканического происхождения, а второй слой — в основном супеси с маломощными прослойками песчаников. До глубины 16 м грунтовые воды не обнаружены. Для обеспечения минимального рассеяния энергии взрывы, осуществленные скважинным методом, произведены на глубине не ниже 9 м с тем, чтобы не выйти из границ туфового слоя.

Основным экспериментам предшествовала серия взрывов с целью регулирования спектра приведенных ускорений согласно условиям статистического подобия и определения оптимального расстояния установки модели от точек взрыва. В результате проведенных исследований определены: количество скважин 12 (4 по 3 ряда) при диаметре 106 мм, глубина заложения взрывчатого вещества 8,5 м, количество заряда $Q=72$ кг. Замедление взрыва одного ряда относительно другого составляет 0,05 с.

Полученный при этих взрывах усредненный спектр приведенных сейсмических ускорений был сопоставлен со спектром ускорений для землетрясений интенсивностью 6 баллов, полученным в результате сейсмологических исследований территории строительства данного сооружения, и из условия (2) определено оптимальное значение множителя подобия для времени $\xi=0,0966$ (рис. 2). Как видно из рис. 2, совпадение спектров приведенных ускорений при взрывах и землетрясении удовлетворительное, — отклонение максимальных ускорений составляет 7%.

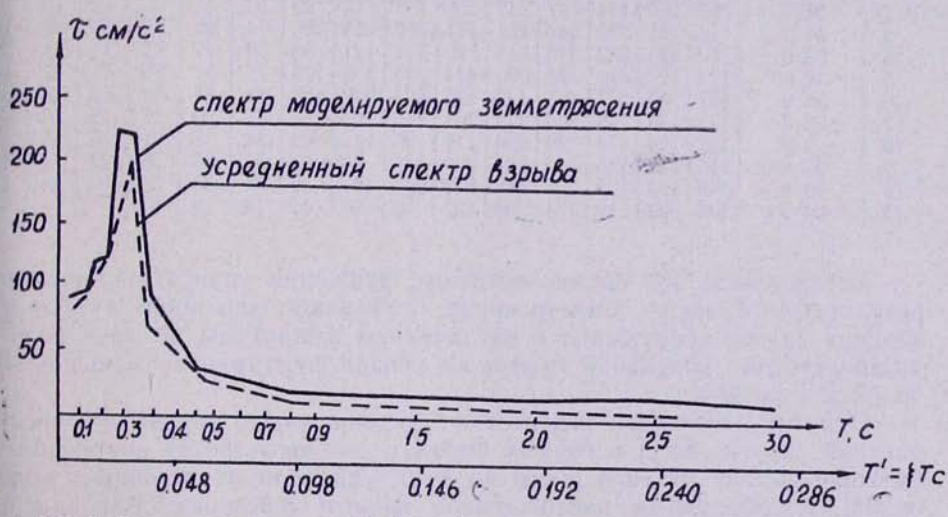


Рис. 2. Спектры приведенных ускорений взрыва и моделируемого землетрясения

Выбор множителя подобия линейных размеров α произведен из конструктивных соображений. При этом наиболее удобным являлся масштаб $\alpha=0,03$, который обеспечивал устойчивость основных несущих конструкций модели. Такой масштаб удобен еще и тем, что соз-

даются лучшие условия для проведения эксперимента в полевых условиях на сеймовзрывные воздействия. Расчет остальных множителей подобия при известных значениях α и ξ дал следующие результаты для напряжений $\beta=0,058$; для деформаций $\gamma=0,31$; для модулей деформаций $\xi\gamma=0,18$. Подбор модельного материала произведен на основе статистического подобия путем сопоставления индикаторных кривых материалов модели и оригинала. При этом в качестве армирующих материалов (конструкции) применены стержни из алюминия трех диаметров: 2,25; 3,03 и 4,15 мм, с пределом текучести $\sigma_{ат}=20$ МПа и модулем упругости $E_1=40000$ МПа. Модель выполнена из бетона на мелкозернистых заполнителях с модулем упругости $E_2=5400$ МПа и приведенной прочностью $R_{пр}^1=1,2$ МПа.

Модель сооружения с указанными параметрами была возведена непосредственно на грунте, на расстоянии 12,5 м от точек взрыва.

По результатам предварительных испытаний определялись частота собственных колебаний модели и декремент затухания соответственно равные $f=31,2$ Гц, $\delta=0,286$.

Измерение ускорений проводилось в 10 отметках сооружения, а также на грунте, непосредственно у фундамента (рис. 1.)

На основе результатов проведенных модельных исследований получены поэтажные акселерограммы на разных уровнях сооружения. Вычисленные из этих акселерограмм спектры приведенных ускорений сведены в табл. 1.

Таблица 1
Спектры приведенных сейсмических ускорений, полученных при взрыве (τ в см/с²)

№ п п	Отметки	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0
1	4.8	127	171	182	206	178	125	120	95	52	40	40	27	21	15	11
2	24.0	107	150	144	191	242	258	256	112	85	42	27	26	19	15	11
3	46.2	188	231	252	344	427	411	309	114	55	64	42	41	28	16	11
4	69.0	180	225	282	340	514	516	277	121	95	50	41	44	33	21	20
5	41.0	144	127	216	303	396	434	295	138	104	75	52	53	47	41	30
6	58.0	137	236	277	361	420	496	527	299	128	84	47	55	55	51	33
7	29.0	102	153	148	203	274	261	175	107	67	41	25	27	16	16	—
8	9.0	121	184	179	229	229	118	96	102	60	34	37	21	15	15	—
9	26.0	116	142	145	180	251	269	146	96	61	37	38	25	20	14	11
10	40.0	148	194	193	279	388	371	238	109	52	46	35	34	19	18	11
11	грунт	104	92	112	134	208	127	90	40	17	14	15	14	—	—	—

Установлено, что высокочастотные движения грунта, являющиеся результатом близких землетрясений, вызывают колебание в области верхних ярусов сооружения с увеличением амплитуды до двух раз, низкочастотные колебания грунта на уровне фундамента уменьшаются более чем на 10%.

Отметим некоторые недостатки предложенного метода. Распространение упругих волн в горных породах сопровождается постепенным уменьшением их интенсивности по мере удаления от источника колебаний, обусловленным расхождением фронта сейсмической волны от точечного источника, поглощением, рассеянием на неоднородностях, отражением и преломлением на границах раздела. Подсчеты показали, что значение эффективного коэффициента затухания продольных волн для туфов равно $\alpha=0,05$ м⁻¹, что гораздо выше, чем затухание сейсмических волн. Однако, учитывая, что размеры модели составляют несколько метров (в нашем случае 4,5×2 м), в пределах которых затухание незначительно, этот фактор при моделировании сооружений с

помощью сейсмозрывных воздействий можно не учитывать.

Серьезным допущением при такого рода исследованиях является малая длительность сейсмозрывного воздействия. Средняя длительность произведенных взрывов составляет $t' = 0,75$ с, для оригинала составляет $t = \frac{t'}{\xi} = \frac{0,75}{0,096} = 7,9$ с, что по сравнению с длительностью

6-балльных землетрясений значительно меньше. В частности, смоделированное землетрясение имело длительность 12 с.

В целом, несмотря на существенные различия в колебаниях почвы при взрыве и землетрясении, опыт с моделью показывает все же принципиальную возможность применения сейсмозрывного воздействия для моделирования сейсмической нагрузки с достаточной точностью, а также для оценки степени сейсмостойкости крупных сооружений.

Ордена Трудового Красного Знамени
Институт геофизики и инженерной
сейсмологии АН АрмССР

ЛИТЕРАТУРА

1. Амасян Р. О., Амбарцумян Г. Г. К вероятностному подходу моделирования сейсмических процессов. ДАН АН АрмССР, т. XIX, № 4.
2. Кириллов А. П., Амбрашвили Ю. К. Сейсмостойкость атомных электростанций. Энергоатомиздат, М., 1985.
3. Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1965.
4. Сагдиев Т. Г. Исследование кирпичной фабрично-заводской трубы на сейсмозрывные воздействия. Изв. АН Таджикской ССР, № 1 (2). Душанбе, 1960.
5. Шагилян С. Г. Исследование сейсмостойкости крупноблочных домов на моделях. Изд. ЛИТ по строительству, М., 1967.