

С. С. ДАРБИНЯН, А. Г. НАЗАРОВ

К РАСЧЕТУ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В настоящее время в разных организациях собираются комплекты разнообразных акселерограмм землетрясений, распределенных по балльности 7, 8 и 9. Акселерограммы эти табулируются для возможности использования электронной вычислительной машины при расчете сооружений на сейсмические воздействия.

В этой работе предлагается метод расчета сооружений на сейсмостойкость с использованием акселерограмм землетрясений, сущность которого заключается в следующем [5]. Положим, требуется рассчитать сооружение на землетрясение интенсивностью 8 баллов. Определяются сейсмические силы, действующие в элементах сооружения на основе использования каждой из акселерограмм, отнесенной к балльности 8. Для каждого элемента сооружения выбирается невыгоднейшее значение сейсмической силы и по ней осуществляется подбор сечения элемента.

Рассмотрим колебание сооружения, представленного в виде системы со многими степенями свободы (рис. 1). Движение такой системы можно характеризовать следующей системой дифференциальных уравнений [1]:

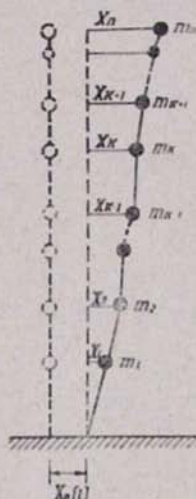


Рис. 1. Расчетная схема сооружения

$$m_k \ddot{x}_k + (C_k + C_{k+1}) \dot{x}_k - C_k \dot{x}_{k-1} - C_{k+1} \dot{x}_{k+1} = -m_k \ddot{x}_0^*, \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n), \quad (1)$$

где x_k — горизонтальное перемещение массы m_k ;
 C_k — жесткость части системы длиной l_k ;
 $\ddot{x}_0^*$ — закон колебания почвы.

Переходим к обобщенным координатам по формулам:

$$x_k = \sum_{i=1}^n a_{ki} \theta_i, \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (2)$$

Тогда получим уравнения движения в виде

$$\ddot{\theta}_i + \omega_i^2 \theta_i = - \frac{\ddot{x}_0^*}{a_{i1}} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{a_{ki}}{a_{i1}} m_k}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{a_{ki}}{a_{i1}} \right)^2 m_k}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

Учитывая затухание по [3] и принимая $q_i = a_{i1} \theta_i$, окончательно получим:

$$q_i'' + \alpha \omega_i q_i' + \omega_i^2 q_i = -x_0'' \frac{\sum_{k=1}^n \frac{a_{ki}}{a_{1i}} m_k}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{a_{ki}}{a_{1i}} \right)^2 m_k}, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

где α — коэффициент затухания, ω_i^2 — квадраты круговых частот, которые определяются из следующего векового уравнения:

$$\begin{vmatrix} C_1 + C_2 - m_1 \omega^2 & -C_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -C_2 & C_2 + C_3 - m_2 \omega^2 & -C_3 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & C_{n-1} + C_n - m_{n-1} \omega^2 - C_n & & \\ 0 & 0 & 0 & -C_n & C_n - m_n \omega^2 & \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

Отношения $\frac{a_{ki}}{a_{1i}}$, входящие в (4), определяются из соотношений:

$$\frac{a_{ki}}{a_{1i}} = \frac{1}{C_k} \left[(C_{k-1} + C_k - m_{k-1} \omega_i^2) \frac{a_{k-1,i}}{a_{1i}} - C_{k-1} \frac{a_{k-2,i}}{a_{1i}} \right],$$

$$\left(\begin{matrix} k = 2, 3, \dots, n \\ i = 1, 2, 3, \dots, n \end{matrix} \right). \quad (6)$$

Таким образом, для решения задачи определяем из векового уравнения (5) значения ω_i , затем для каждого ω_i находим отношения

$\frac{a_{ki}}{a_{1i}}$ из (6). После этого решаем уравнения (4) и по найденным q_i определяем перемещения по формулам

$$x_k = \sum_{i=1}^n \frac{a_{ki}}{a_{1i}} q_i, \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (7)$$

Имея величины x_k , можем определить поперечные и сейсмические силы:

$$Q_k = C_k (x_k - x_{k-1}),$$

$$S_k = Q_k - Q_{k+1},$$

$$(k = 1, 2, \dots, n)$$

при этом принимаем, что $Q_{n+1} = 0$, $x_0 = 0$.

Определим расчетную сейсмическую нагрузку на четырехэтажное каркасное здание в поперечном направлении для восьмибалльного землетрясения. Для сравнения получаемых результатов с имеющимися данными мы берем пример расчета из книги [3], где приведены все характеристики здания и определены сейсмические нагрузки по существующим нормам.

Сосредоточенные массы и единичные перемещения для этого здания имеют следующие значения [3]:

$$\begin{array}{ll}
m_1 = 0,794 \frac{m \text{ сек}^2}{\text{см}} & \delta_{11} = 4,40 \cdot 10^{-4} \frac{\text{см}}{m} \\
m_2 = 0,743 & \delta_{22} = 8,75 \cdot 10^{-4} \\
m_3 = 0,743 & \delta_{33} = 13,10 \cdot 10^{-4} \\
m_4 = 0,729 & \delta_{44} = 17,45 \cdot 10^{-4}
\end{array}$$

Имея единичные перемещения, определяем жесткости C_k , после чего на основании (5) с помощью ЭЦВМ находим частоты колебаний. Для них получены следующие значения:

$$\begin{array}{lll}
C_1 = 0,2270 \cdot 10^4 \frac{m}{\text{см}} & \omega_1 = 19,311 \frac{1}{\text{сек}} & T_1 = 0,325 \text{ сек} \\
C_2 = 0,2300 \cdot 10^4 & \omega_2 = 55,043 & T_2 = 0,114 \\
C_3 = 0,2300 \cdot 10^4 & \omega_3 = 84,090 & T_3 = 0,075 \\
C_4 = 0,2300 \cdot 10^4 & \omega_4 = 104,015 & T_4 = 0,060
\end{array}$$

Отметим, что в [3] для периода собственных колебаний получен $T_1 = 0,322 \text{ сек}$.

Для дальнейшего решения задачи, то есть для интегрирования (4), необходимо задать закон изменения внешнего воздействия $x_0^*(t)$. В качестве такого нами взяты акселерограммы девяти прошлых землетрясений интенсивностью 8 баллов [6]. Акселерограммы этих землетрясений приведены на рис. 2, где стрелками указаны участки, использованные для решения задачи. Основные характеристики этих землетрясений даны в табл. 1. Эти акселерограммы соответствующим образом были табулированы и, следовательно, функция $x_0^*(t)$ была задана в табличной форме.

Таблица 1
Основные характеристики землетрясений

№ землетрясения	Дата землетрясения	Балльность	Расстояние от эпицентра, км	Период, сек	Ускорения в долях g	Горизонтальные составляющие	Шаг табулирования, сек	Число табулированных точек
1	3/X 1941	7	24	0,38	0,078	60	0,0200	480
2	9/X 1949	8	22	0,32	0,120	21	0,0132	414
3	12/I 1954	7	42	0,30	0,070	20	0,0143	599
4	11/IX 1938	7	20	0,18	0,093	42	0,0182	450
5	18/XI 1948	7	195	0,25	0,062	81	0,0179	485
6	13/IV 1949	7	60	0,88	0,059	66	0,0200	865
7	7/X 1951	7	53	0,67	0,038	9	0,0200	440
8	21/VII 1952	8	18	0,24	0,158	40	0,0204	646
9	21/VII 1952	7	100	0,68	0,049	20	0,0330	440
10	21/XII 1954	9	7	0,40	0,225	10	0,0222	240

При решении задачи ординаты землетрясений интенсивностью 7 баллов были удвоены, то есть приближенно их превратили в восьмибалльные.

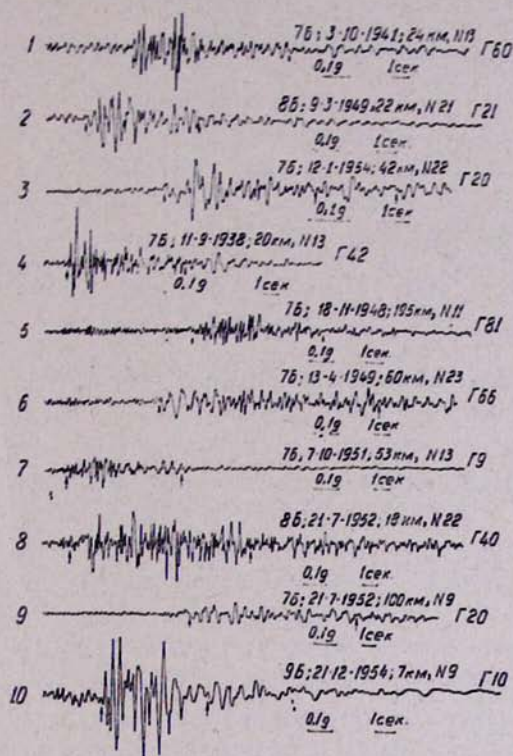


Рис. 2. Акселерограммы землетрясений, использованных при вычислениях

Рассматриваемая задача была решена на ЭЦВМ методом Рунге-Кутты¹. Программа вычислений была составлена так, что получились величины перемещений x_k , деформаций $x_k - x_{k-1}$, их скорости, поперечные силы Q_k и сейсмические нагрузки S_k с соответствующими моментами времени, а также их максимальные значения.

В таб. 2, 3 и 4 приведены максимальные величины сейсмических нагрузок S_k по этажам, горизонтальных перемещений x_k сосредоточенных масс и поперечных сил Q_k при коэффициенте затухания $\alpha = 0,1$, то есть при декременте затухания $\delta = 0,31$.

Анализ результатов вычислений показывает, что при расчете по акселерограммам сейсмические нагрузки получаются в несколько раз больше по отношению к их значениям, полученным по нормам.

Такое большое расхождение величин сейсмических нагрузок может вызвать возражения, особенно со стороны инженеров-проектировщиков.

¹ Программа вычислений была составлена А. А. Джаназяном, которому приносим благодарность.

Однако следует учесть, что здесь приводится лишь идея метода расчета. Мы не останавливаемся на многих факторах действительной работы конструкции, которые могут резко снизить значения сейсмических нагрузок по предложенному методу.

Таблица 2

Значения максимальных сейсмических нагрузок (в тоннах)

Этаж	Номера землетрясений										Велич. по норм. СН — 8-5-57
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
IV	434	451	318	361	306	343	308	391	193	703	105
III	355	407	289	327	274	306	295	370	180	628	96
II	281	299	231	257	187	234	262	332	151	517	75
I	237	187	160	171	158	167	188	256	119	402	47

Таблица 3

Значения максимальных перемещений (в см)

Этаж	Номера землетрясений									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IV	1,46	1,65	1,17	1,33	1,04	1,26	1,22	1,52	0,76	2,55
III	1,27	1,45	1,04	1,18	0,91	1,12	1,09	1,37	0,67	2,25
II	0,93	1,08	0,78	0,88	0,67	0,83	0,83	1,04	0,51	1,69
I	0,51	0,58	0,42	0,47	0,35	0,45	0,46	0,58	0,28	0,92

Из этих факторов, по нашему мнению, основным являются упруго-пластические свойства материала конструкции, которые, как показывают исследования [2], приводят к существенному снижению сейсмического эффекта. Эти вопросы требуют специального изучения.

С целью сравнения воздействий 8 и 9-балльных землетрясений во всех таблицах приведены также результаты решений для землетрясения № 10, интенсивностью в 9 баллов. Отметим, что для этого землетрясения сейсмические нагрузки получаются примерно в два раза больше по сравнению с восьмibalльными. Это землетрясение в [6] отнесено к 8-балльным, однако оно больше близко к 9-и баллам.

Предположим, что использованные девять акселерограмм интенсивностью 8 баллов составляют один набор, для которого должны рассчитывать рассматриваемое здание. Из табл. 4 видно, что для землетрясения № 2 на уровнях II, III и IV этажей поперечные силы больше, чем для остальных восьми, а на уровне первого этажа поперечные силы получаются больше для землетрясения № 8. Следовательно, для расчета дан-

ного сооружения из всего набора акселерограмм необходимо взять акселерограммы землетрясений № 2 и № 8.

Таблица 4

Значения максимальных поперечных сил в тоннах

Этаж	Номера землетрясений										Значение по нормам СН 8-57
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
IV	434	459	318	361	306	343	308	391	193	703	105
III	789	858	607	684	580	618	596	757	373	1314	201
II	1018	1155	821	935	742	878	850	1069	524	1790	276
I	1162	1314	960	1076	794	1024	1034	1317	643	2036	323

Из табл. 2 видно, что с точки зрения оценки максимальных сейсмических сил S_k также надо взять землетрясения № 2 и № 8, так как среди всех рассмотренных 9 акселерограмм на уровне первого и второго этажей сейсмические силы получаются больше для акселерограммы № 8, а на уровне третьего и четвертого этажей—для № 2.

Таким образом, из имеющегося набора акселерограмм мы выбирали те, которые необходимо использовать при расчете рассматриваемого здания в районе с сейсмичностью 8 баллов.

Здесь оценку сопротивляемости элементов сооружения сейсмическим воздействиям осуществляем обобщенно. Именно определяем суммарные поперечные силы в пределах данного этажа от всех акселерограмм и принимаем в основу расчета для данного элемента максимальную поперечную силу.

Нетрудно показать, что в общем случае число акселерограмм, необходимых для расчета, всегда меньше или равно числу степеней свободы рассматриваемой системы, независимо от количества акселерограмм данного набора.

Действительно, предположим имеем ν экземпляров акселерограмм данного набора и должны рассчитать здание, расчетная схема которого представляет собой систему с n степенями свободы, притом для общности принимаем $\nu > n$. Определяя для всех ν акселерограмм сейсмические силы, получим на уровнях каждого этажа ν значений сейсмической силы, т. е. $\nu \times n$ величин сейсмических нагрузок (принимаем, что все значения этих нагрузок различны между собой). Тогда выбираем для данного этажа то землетрясение, для которого получается наибольшая сейсмическая сила. Разумеется, для данного этажа из ν акселерограмм будет только одна, дающая наибольшую поперечную силу, так как принимали, что они все различаются.

Если для каждого этажа имеем одну акселерограмму, то для n этажей будем иметь n экземпляров акселерограмм.

Отметим, что доказанное справедливо и в тех случаях, когда

значения сейсмических сил для определенного количества акселерограмм r равны между собой. Тогда, если величины остальных $v - r$ сейсмических сил большие, то акселерограммы для расчета выбираются из них, а если они меньше от r сейсмических нагрузок, то выбор делается из этих r акселерограмм. В этом случае одно землетрясение будет достаточно для расчета (последнее справедливо и тогда, когда для одного землетрясения сейсмические силы получают-ся больше, чем для остальных $v - 1$ землетрясений).

В предложенной методике расчета сооружений на сейсмостойкость большое значение имеет выбор набора акселерограмм. Следует максимально точно классифицировать их по балльности с учетом грунтовых условий станций, регистрирующих землетрясения. Необходимость этого видна и из табл. 2, где для девяти землетрясений получился большой разброс величин сейсмических нагрузок. Этот разброс уменьшится, если мы классификацию акселерограмм, входящих в данный набор, выполним более точно. Этим самым сократим в итоге число землетрясений, подлежащих учету при вычислении.

Немаловажным является вопрос объема вычислительных работ при применении предложенного метода. Однако и этот вопрос решается положительно. Действительно, акселерограммы данного набора табулируются один раз и навсегда. Программа вычислений для данного сооружения или для определенного класса сооружений составляется в общем случае как для системы со многими степенями свободы, и для всех акселерограмм вычисления ведутся по одной и той же программе.

Здесь остается только вопрос машинного времени, который будет различным для разных зданий и акселерограмм. Но современные вычислительные машины позволяют такие расчеты производить в очень короткий промежуток времени. Так, например, определение сейсмических нагрузок для рассматриваемого четырехэтажного здания для 10 акселерограмм потребовало примерно 60 часов машинного времени при средней скорости вычислительных операций—4 тысячи в секунду.

Резюмируя изложенное, приходим к выводу, что уже в настоящее время можно применять предложенный метод расчета, для чего необходимо:

1. Собрать все существующие акселерограммы сильных землетрясений и систематизировать их по балльностям (определение спектрального состава в зависимости от грунтовых условий, дальности расположения очагов землетрясений и т. д.).
2. Табулировать полученные наборы акселерограмм для использования их в расчетах на сейсмостойкость.

Этот метод расчета имеет перспективу своего дальнейшего развития с развитием инженерной сейсмологии.

Ордена Трудового Красного Знамени
Институт геофизики
и инженерной сейсмологии
АН Армянской ССР

ЛИТЕРАТУРА

1. Дарбинян С. С. Сдвиговые колебания системы со многими степенями свободы за пределом упругости. «Известия АН Арм. ССР» (серия техн. наук), т. XIII, № 1, 1960.
2. Дарбинян С. С. О снижении сейсмического эффекта в сооружениях. ДАН Арм. ССР, т. XLIX, № 1, 1969.
3. Корчинский И. Л. и др. Основы проектирования зданий в сейсмических районах. М., 1961.
4. Назаров А. Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил. Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1959.
5. Назаров А. Г., Дарбинян С. С., Шагинян С. Г. Метод расчета сооружений на сейсмостойкость. ДАН Арм. ССР, т. XLVII, № 1, 1968.
6. Медведев С. В. Ускорение колебаний грунта при сильных землетрясениях. Тр. Института физики земли АН СССР, № 10 (177), 1960.