

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

Э. Е. ХАЧИЯН

РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ С УЧЕТОМ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Методы расчета и проектирования сейсмостойких конструкций, основанные на их представлении как упругих систем, показывают, что возникающие в них инерционные силы при землетрясении достигают огромных значений. В настоящее время существует мнение, согласно которому нельзя требовать, чтобы ни один из элементов сооружения при землетрясении не был бы поврежден, так как это приводит к удорожанию строительства. Это приводит к такому проектированию, при котором допускаются повышенные напряжения в некоторых узлах и элементах конструкции, а иногда допускаются локальные разрушения, капитальный ремонт которых не требует больших затрат.

В отдельных узлах таких сооружений после землетрясения возникают остаточные деформации, значения которых должны быть ограничены условием исключающим выход из строя основных несущих элементов. Принципиальная трудность упруго-пластической задачи теории сейсмостойкости заключается в отсутствии с одной стороны экспериментальных работ об истинных закономерностях динамического деформирования конструкций за пределами упругости, а с другой—адекватных сведений о характере колебания почвы при землетрясении.

Первые исследования, посвященные учету пластических деформаций в расчете сооружений на сейсмостойкость, были работы Р. Та-набаси [10] и Дж. Хаузнера [11]. Различным вопросам учета пластических деформаций при динамических воздействиях посвящены работы И. М. Рабиновича, А. А. Гвоздева, И. И. Гольденבלата, С. С. Дарбиняна, Г. И. Карцивалдзе, И. А. Николаенко, Т. И. Чачава и др. Большое внимание расчету упруго-пластических деформаций было уделено на Второй всемирной конференции по сейсмостойкому строительству [7].

В данной статье приводятся результаты изучения упруго-пластических колебаний системы с одной степенью свободы по акселерограммам четырех сильных землетрясений силой 7 и 8 баллов. Вычисления были выполнены при помощи электронных вычислительных машин. Получены значения максимальных перемещений, пластических и остаточных деформаций при зависимости восстанавливающей силы от перемещения по диаграмме Прандтля.

1. В связи с отсутствием методов прогнозирования будущих зем-

летрясений, будем считать, что, проектирование сооружения необходимо осуществить на основании имеющейся реальной акселерограммы прошлого землетрясения. При осуществлении проектирования в пределах упругих деформаций определяем сначала период свободных колебаний и декремент затухания, а затем по этим характеристикам определяем максимальное значение сейсмической нагрузки. Поперечные сечения отдельных элементов выбираем с таким расчетом, чтобы возникающие в них напряжения не превосходили предела упругости. В сооружении, спроектированном таким образом, после землетрясения не будут никаких повреждений и остаточных деформаций. Однако, при таком подходе к задаче, в силу значительности сейсмической нагрузки, поперечные размеры несущих элементов получаются очень большими, что приводит к значительной затрате материалов.

Теперь поставленную задачу решим, учитывая работу конструкции за пределом упругости. Обозначим максимальное значение сейсмической нагрузки, вычисленной по акселерограмме при упругих колебаниях через S_{\max} . Допустим, что значение S_{\max} достигается в момент времени t_{\max} . Проектирование сооружения производим таким образом, чтобы при достижении сейсмической нагрузки в момент времени $t_1 < t_{\max}$ значения γS_{\max} , где $\gamma < 1$, в некоторых элементах и узлах напряжения достигли предела упругости. После момента $t > t_1$ в этих узлах начнутся пластические деформации, вследствие чего произойдет значительное увеличение диссипативной способности сооружения из-за необратимой потери энергии при пластических деформациях и значение сейсмической нагрузки больше не достигнет своего максимального значения S_{\max} .

Таким образом часть максимальной кинетической энергии, сообщаемой землетрясением сооружению, будет идти на работу для образования пластических деформаций.

После землетрясения в сооружении возникнут некоторые остаточные деформации, значения которых существенным образом зависят от характера колебательного движения почвы, от периода свободных колебаний, а также от значения коэффициента γ . Задаваясь различными значениями γ , для данного значения периода свободных колебаний T и декремента затухания δ , получим максимальные значения остаточных деформаций для данного землетрясения.

В качестве расчетной схемы примем систему с одной степенью свободы. Будем считать, что материал конструкции подчиняется идеально-пластическому закону Прандтля (рис. 1).

В упругой стадии (0-1) восстанавливающая сила пропорциональна прогибу

$$R_1(y) = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 y_1, \quad (1)$$

и уравнение движения пишется в виде

$$y_1'' + \frac{2\pi}{T} \alpha y_1' + \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 y_1 = -\dot{y}_0(t), \quad (2)$$

где y_1 — относительное перемещение массы; T — период свободных колебаний; α — коэффициент внутреннего трения; $y_0(t)$ — закон ускорения основания.

При упругих колебаниях для маленьких значений коэффициента внутреннего трения α , сейсмическая нагрузка пропорциональна прогибу, и выражается формулой

$$S = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 y_1. \quad (3)$$

Следовательно, как только y_1 достигнет значения $\gamma y_{1\max}$, сейсмическая нагрузка также достигнет значения γS_{\max} . Обозначим через t_1 момент времени, при котором y_1 достигнет значения $y_1(t_1) = \gamma y_{1\max}$. После момента t_1 начинается пластическое течение (1—2); восстанавливающая сила будет постоянной и равной

$$R_2(y) = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 y_1(t_1) \quad (4)$$

и уравнение движения переходит в

$$y_2'' + \frac{2\pi}{T} \alpha y_2' + \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 y_1(t_1) = -y_0'(t). \quad (5)$$

Уравнением (5) следует пользоваться при условии пока

$$y_2' \neq 0. \quad (6)$$

Обозначим через t_2 момент времени, при котором впервые нарушается условие (6). Значение y_2 в этот момент обозначим через $y_2^{\text{пред}}$. После момента времени t_2 начинается разгрузка (2—3). Восстанавливающая сила при этом будет иметь вид

$$R_3(y) = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 [y_2 - y_2^{\text{пред}} + y_1(t_1)]. \quad (7)$$

Уравнение движения системы на этом участке будет

$$y_3'' + \frac{2\pi}{T} \alpha y_3' + \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 [y_2 - y_2^{\text{пред}} + y_1(t_1)] = -y_0'(t). \quad (8)$$

Как только y_3 достигнет значения $y_2^{\text{пред}} - 2y_1(t_1)$ восстанавливающая сила R_3 снова достигнет предельного значения $m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 y_1(t_1)$, но со знаком минус снова начнется пластическое течение, но в обратную сторону (3—4). Восстанавливающая сила будет постоянной и равной

$$R_4(y) = -m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 y_1(t_1), \quad (9)$$

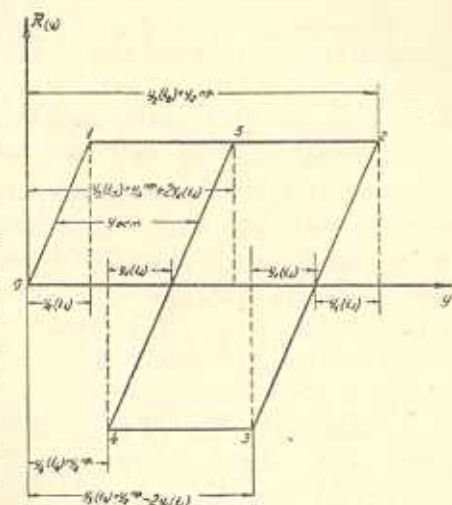


Рис. 1. Связь между восстанавливающей силой и перемещением.

а уравнение движения примет вид

$$y_4' + \frac{2\pi}{T} \alpha y_4' - \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 y_4(t_1) = -y_0'(t). \quad (10)$$

Уравнение (10) остается справедливой до тех пор, пока выполняется условие

$$y_4' \neq 0. \quad (11)$$

Допустим, что в момент $t = t_4$ впервые нарушается условие (11). Значение y_4 в этот момент обозначим через $y_4^{\text{прек}}$. После момента времени t_4 , движение будет аналогично движению в зоне (0-1), но с началом координат в точке $y_4^{\text{прек}} + y_1(t_1)$. Восстанавливающая сила после момента t_4 будет

$$R_3(y) = m \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 [y_3 - y_4^{\text{прек}} - y_1(t_1)]. \quad (12)$$

Уравнение движения на этом участке будет

$$y_5' + \frac{2\pi}{T} \alpha y_5' + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 [y_3 - y_4^{\text{прек}} - y_1(t_1)] = -y_0'(t). \quad (13)$$

Как только y_3 достигает значения $y_4^{\text{прек}} + 2y_1(t_1)$ восстанавливающая сила снова достигнет $m \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 y_1(t_1)$ и начнется второй цикл пластических деформаций. После этого момента y_3 переходит в y_2 по уравнению (5). Потом y_2 снова переходит в y_3 , y_3 переходит в y_4 , y_4 в y_5 и снова y_3 переходит в y_2 , y_2 в y_3 согласно уравнениям (5), (8), (10) и (13) и вышеописанным условиям переходов. Этот процесс продолжается до полного прекращения действия функции $y_0'(t)$. Если в какой-нибудь промежуток времени окажется, что условия перехода не удовлетворяются, то вычисления до конца производятся по уравнению данной стадии.

2. Вычислительные работы были произведены Вычислительным центром АН Армянской ССР и Ереванского государственного университета, на электронной машине. В качестве закона ускорения основания были приняты четыре реальные акселерограммы сильных землетрясений [12].

Для экономии машинного времени дифференциальные уравнения (5), (8), (10) и (13) были интегрированы непосредственно численным методом. При этом, кроме вышеописанных условий переходов были приняты следующие начальные условия и условия сопряжения: при $t = 0$, $y_1 = y_1 = 0$; при $t = t_1$, $y_1 = y_2$, $y_1' = y_2'$; при $t = t_2$, $y_2 = y_3$, $y_2' = y_3'$; при $t = t_3$, $y_3 = y_4$, $y_3' = y_4'$; при $t = t_4$, $y_4 = y_5$, $y_4' = y_5'$. Шаги табулирования соответственно для акселерограмм № 1-4 равнялись 0,0266, 0,0235, 0,0222, 0,0162 сек. Интегрирование уравнений (5), (8), (10), (13) производилось известным методом Рунге-Кутты с переменным шагом вычисления и с учетом соответствующих логических условий перехода от одного уравнения к другому. Интенсивные участки на

акселерограммах, по которым были произведены вычисления для акселерограмм №№ 1—4 соответственно принимались равным 5,999; 5,411; 5,333 и 3,186 сек, максимальные значения ускорений соответственно были 93, 123, 242, 68 см/сек².

Так как в нашем распоряжении были максимальные значения перемещений при чисто упругих колебаниях для данного T , т. е. значения $u_{1 \max}$, которые нами были определены ранее [14], то в память машины были введены и эти значения, что намного сократило машинное время решения задачи. В противном случае пришлось бы сначала интегрировать уравнение (2) от начала до конца, найти $u_{1 \max}$, а потом найти момент времени t_1 , при котором $u_1(t_1) = \gamma u_{1 \max}$. При наличии же $u_{1 \max}$ первое уравнение интегрировалось до тех пор пока впервые u_1 не достигнет значения γ . Программа была составлена таким образом, чтобы для облегчения обработки записывались только точки переходов. Для некоторых вариантов записывались все точки решения с шагом времени равном 0,0067 сек. Для периода свободных колебаний T были приняты значения от 0,1 сек до 0,6 сек с интервалами по 0,05 сек и далее 0,70, 0,80, 1,0, 1,2; 1,5, 2,0, 2,5 3,0 сек. Коэффициент внутреннего трения для периодов $0,1 < T \leq 1,0$ сек был принят равном $\alpha = 0,12$, что соответствует логарифмическому декременту затухания $\delta = 0,37$, а для периодов $1,0 < T \leq 3,0$ сек был принят $\alpha = 0,08$, что соответствует логарифмическому декременту затухания $\delta = 0,24$. Для коэффициента γ были приняты следующие значения 0,7, 0,5, 0,3.

3. При вычислениях записывались только точки переходов, причем записывались как моменты времени t_i , так и соответствующие значения u_i . Полученные значения для акс. № 1 при $\gamma = 0,5$ приведены в табл. 1. Так как после одного цикла u_3 переходит в u_2 , то в таблице после одного цикла следующие значения перемещений соответственно записаны в тех же графах, в каких записаны их значения при первом цикле. По таблице легко считать сколько циклов продолжалась упруго-пластическая деформация. Так, например, при $T = 0,50$ сек имели место 6 циклов упруго-пластических деформаций. Чем меньше значение γ , тем больше циклов. Последняя точка в графе данного T показывает, что после этого значения времени t условие перехода не удовлетворялось, и в системе протекли упругие колебания, но около нового начала координат, положение которого определяется величиной остаточной деформации. После этого момента значения перемещений не записывались. Однако ясно, что дальнейшие значения перемещений по абсолютной величине не могут быть больше, чем в момент последнего перехода. Упругие колебания с остаточной деформацией протекали или по уравнениям для u_2 или по уравнениям для u_3 . Для полного представления об изменении перемещения во времени для некоторых вариантов были получены все значения перемещений от начала до конца с интервалом времени 0,0067 сек. На рис. 2 показан такой график для акселерограммы № 1

Значения перемещений для акселерограммы № 1 при $\gamma=0.5$ (t — в сек, y — в см)

T	t_1 сек	y_1 см	t_2	y_2	t_3	y_3	t_4	y_4	t_5	y_5
0,10	0,54	0,015	0,58	0,025	0,70	-0,006	0,73	-0,008	1,16	0,025
			1,19	0,034	2,54	-0,004	2,60	-0,033	2,63	-0,00
			2,73	0,14	2,77	0,11	2,79	0,10	2,82	0,13
			2,84	0,15	2,88	0,11	2,98	0,04	3,02	0,07
			3,03	0,08	3,07	0,04	3,10	0,04	—	—
0,20	0,69	-0,14	0,72	-0,16	1,64	0,13	1,65	0,12	2,77	-0,16
			2,81	-0,22	3,06	0,06	3,08	0,09	—	—
			0,53	-0,26	0,63	0,22	0,66	0,28	0,76	0,21
			0,81	-0,32	0,91	0,16	0,95	0,23	1,37	-0,25
			1,39	-0,26	2,70	0,24	2,77	0,49	2,93	0,01
0,40	0,97	0,24	2,97	-0,03	—	—	—	—	—	—
			1,00	0,26	1,91	-0,22	1,93	-0,23	2,07	0,25
			2,17	0,39	2,33	-0,09	2,40	-0,23	2,75	0,27
			2,82	0,32	2,96	-0,19	3,13	-0,70	3,37	-0,22
			3,39	-0,21	3,59	-0,70	3,72	-1,07	3,89	-0,59
0,50	0,99	0,32	3,96	-0,51	4,12	-0,99	4,17	-1,07	4,41	-0,59
			4,43	-0,58	4,67	-1,06	4,71	-1,08	—	—
			1,02	0,35	1,87	-0,30	1,92	-0,35	2,09	0,30
			2,18	0,46	2,35	-0,19	2,41	-0,31	2,75	0,34
			2,79	0,40	2,97	-0,26	3,13	-0,79	3,37	-0,14
0,60	1,66	-0,73	3,43	-0,10	3,61	-0,78	3,73	-1,19	3,93	-0,53
			3,90	-0,45	4,18	-1,10	4,23	-1,14	4,45	-0,49
			4,50	-0,45	4,70	-1,10	4,76	-1,19	5,51	-0,54
			5,53	-0,53	—	—	—	—	—	—
			1,97	-0,74	2,24	0,72	2,25	0,72	3,05	-0,78
0,80	2,63	-0,40	3,17	-1,37	3,43	0,09	3,49	0,21	3,69	-1,26
			3,77	-1,53	—	—	—	—	—	—
			2,65	-0,49	2,87	0,44	2,91	0,50	3,20	-0,44
			3,28	-0,78	3,52	0,16	3,57	0,24	—	—
			2,67	-0,70	3,51	0,04	3,61	0,29	—	—
1,00	2,58	-0,36	3,35	-1,11	—	—	—	—	—	—
			3,37	-1,32	—	—	—	—	—	—
			3,11	-0,55	—	—	—	—	—	—
			3,11	-0,73	—	—	—	—	—	—
			3,12	-0,97	—	—	—	—	—	—
3,00	3,18	-1,14	3,40	-1,80	5,01	0,14	5,19	0,23	—	—
			3,43	-1,84	5,14	0,46	5,39	0,98	—	—

при $T=0,3$, $\gamma=0,5$, с указанием момента начала и конца пластических деформаций, а также величины остальных деформаций. Пунктиром показана новая ось времени t , относительно которой протекали

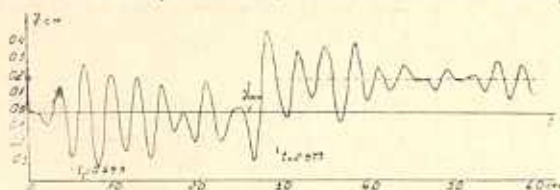


Рис. 2. График изменения перемещения во времени.

колебания после остаточной деформации. Имея значения точек переходов построены диаграммы „восстанавливающая сила—перемещение“. Такие диаграммы для акселерограммы № 3 приведены на рис. 3. Пунктиром на диаграммах показаны возможные упругие колебания около нового начала координат, после остаточной деформации. Некоторые циклы, особенно при малых значениях T , почти совпадали друг с другом, поэтому в этих случаях на диаграммах указаны только точки переходов одного цикла. Для больших значений периода свободных колебаний T , даже при малых значениях γ имел максимум только один цикл упруго-пластических деформаций.

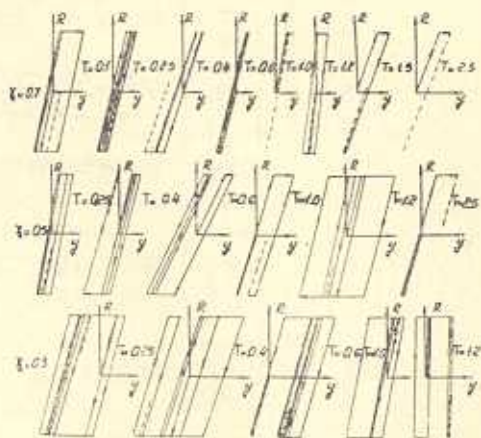


Рис. 3. Диаграммы „Восстанавливающая сила—перемещение“.

При больших значениях γ даже одного полного цикла упруго-пластических деформаций не получилось. Это обстоятельство, по-видимому, подтверждает высказанное нами ранее [12] утверждение, что воздействие землетрясения на гибкие сооружения подобно воздействию отдельного импульса (удара), так как известно, что при импульсивном нагружении, в силу затухания, после первой пластической деформации, восстанавливающая сила резко уменьшается и в системе пластические деформации обратного знака больше не появляются.

4. По записям перемещений определялись также значения полных максимальных перемещений (упругие + пластическое), приведенные в табл. 2. Спектры максимальных перемещений для акселерограмм № 1—4 приведены на рис. 4, где для сравнения пунктиром приведены спектры при упругих колебаниях. Из таблиц и спектров перемещений видно, что пластические деформации существенного влияния на максимальные перемещения системы не оказывают, особенно при

Таблица 2

Значения максимальных перемещений для акселерограмм № 1—4 (в сантиметрах)

Тв сек	Акселерограмма № 1			Акселерограмма № 2			Акселерограмма № 3			Акселерограмма № 4						
	$\gamma=0,7$	$\gamma=0,5$	$\gamma=0,3$	упругий расчет	$\gamma=0,7$	$\gamma=0,5$	$\gamma=0,3$	упругий расчет	$\gamma=0,7$	$\gamma=0,5$	$\gamma=0,3$	упругий расчет	$\gamma=0,7$	$\gamma=0,5$	$\gamma=0,3$	упругий расчет
0,10	0,08	0,15	0,13	-0,03	0,05	0,08	-0,47	0,05	-0,09	-0,91	-0,75	0,07	0,11	0,18	-0,17	0,02
0,15	0,14	0,13	-0,17	-0,09	-0,16	-0,19	-0,44	0,15	0,17	-0,20	1,90	-0,23	0,09	0,13	-0,19	-0,09
0,20	-0,23	-0,22	0,26	0,25	-0,27	-0,17	-0,33	0,24	0,53	-0,68	1,24	0,56	0,23	0,30	-0,24	-0,23
0,25	-0,38	-0,34	-0,41	-0,44	-0,44	-0,50	-0,54	0,35	1,16	1,11	1,25	-0,99	-0,30	-0,17	0,44	-0,33
0,30	-0,44	0,48	-0,35	-0,45	-0,86	0,63	-0,55	0,87	1,66	3,13	1,27	1,60	-0,33	-0,27	0,22	0,32
0,35	0,55	0,43	0,47	0,63	-1,32	1,12	1,05	-1,32	2,37	1,99	2,89	-2,41	0,40	0,47	0,56	-0,46
0,40	0,62	-0,29	0,64	0,58	-0,97	0,83	1,27	-1,11	3,91	3,67	-2,94	2,96	-0,44	0,43	1,07	0,50
0,45	-0,41	1,08	1,45	0,47	1,37	-1,07	1,14	1,47	3,87	4,14	3,85	3,97	0,48	0,44	0,42	0,55
0,50	0,52	1,19	1,37	0,63	1,62	1,09	1,21	-1,74	4,18	3,41	-3,83	-4,27	0,52	0,55	0,40	-0,62
0,55	-1,05	1,26	1,27	1,04	1,60	1,24	1,23	-1,57	3,45	3,81	3,99	3,01	0,69	0,76	-0,42	-0,78
0,60	1,49	1,53	-0,97	1,46	1,63	1,61	1,49	-1,60	5,34	5,04	6,60	5,53	0,61	0,53	0,55	0,80
0,70	0,82	-0,79	-1,13	0,97	1,49	1,88	-3,23	-1,45	4,98	-6,33	4,54	6,05	-0,71	0,64	0,55	0,72
0,80	-0,80	-0,78	1,13	-0,89	2,19	1,76	1,65	-2,06	4,02	3,40	4,83	4,57	-0,95	0,71	0,77	-1,05
1,0	-0,68	-0,70	-0,63	0,65	2,66	-2,83	-2,52	2,81	3,44	3,91	4,10	-3,87	-0,93	-1,16	-1,65	-0,990
1,2	-0,63	-0,64	-0,59	0,62	2,16	-2,21	-1,53	2,34	3,61	4,99	13,28	2,96	-1,41	-1,56	1,88	1,35
1,5	-1,04	-1,11	0,38	1,08	-2,09	-2,09	-1,46	2,51	8,55	7,67	7,12	-8,04	-1,70	-1,79	-2,42	1,71
2,0	1,26	1,32	0,79	1,41	-1,96	1,60	1,49	2,43	14,37	14,00	13,91	14,30	-1,90	-2,02	-3,40	1,82
2,5	1,73	1,80	-1,94	1,90	-	1,59	1,67	2,38	18,04	19,84	11,31	17,26	-2,01	-3,18	-	1,90
3,0	-1,80	-1,84	-1,92	2,28	-1,84	-1,83	1,33	2,05	18,59	15,68	-12,66	-18,48	-2,78	-3,19	-	2,74

значениях $0,1 < T < 1,2$ сек. Более значительное влияние пластические деформации оказывают при малых значениях γ , т. е. при сравнительно низких значениях предела упругости и для гибких систем. Максимальные значения перемещений с учетом пластических дефор-

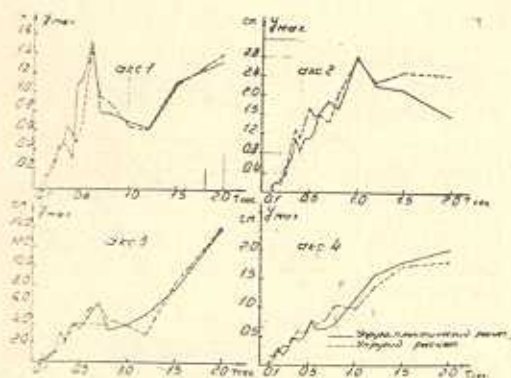


Рис. 4. Спектры максимальных перемещений.

маций, в некоторых случаях по абсолютной величине меньше своих значений, по сравнению с чисто упругими колебаниями.

Спектры максимальных ускорений с учетом пластических деформаций, по принятой нами методике расчета качественно не будет отличаться от аналогичных спектров при упругих колебаниях [12]. Разница будет только в том, что все координаты спектра уменьшатся в γ раз.

5. При расчете сооружений с учетом пластических деформаций основным критерием несущей способности конструкции является величина остаточной деформации. В отличие от статического действия сил, при котором пластические деформации могут образоваться только в одном направлении, при динамических воздействиях пластические деформации могут образоваться в двух противоположных направлениях. При этом, в принципе, может случиться, что при нагрузке образовавшаяся пластическая деформация после разгрузки может полностью исчезнуть и в системе остаточных деформаций не будет. Но система может оказаться не способной выдерживать первоначальные пластические деформации и выйти из строя до наступления разгрузки. Поэтому в динамических расчетах наряду с остаточной деформацией, по-видимому, необходимо определить также значения наибольших пластических деформаций, т. е. значения $u_2^{\text{пред.}} - u_1(t_1)$ и $u_4^{\text{пред.}} - u_3(t_3)$.

Значение остаточной деформации определяем как расстояние между первоначальной упругой линией (0—1) и пунктирной линией на диаграммах (рис. 3) или как абсолютную разницу значений перемещений первой и последней точек в табл. 1. В табл. 3 приведены значения остаточных деформаций и наибольших пластических деформаций соответственно для акселерограмм № 1—№ 4. В гибких системах, для которых имеют место пластические деформации только в

Таблица 3

Значения наибольших пластических и остаточных деформаций для акселерограмм № 1—4 (в сантиметрах)

Т, сек	Акселерограмма № 1				Акселерограмма № 2				Акселерограмма № 3				Акселерограмма № 4					
	$\gamma=0,7$		$\gamma=0,5$		$\gamma=0,7$		$\gamma=0,5$		$\gamma=0,7$		$\gamma=0,5$		$\gamma=0,3$		$\gamma=0,7$		$\gamma=0,3$	
	наибольшая пластическая деформация	остаточная деформация	наибольшая пластическая деформация	остаточная деформация	наибольшая пластическая деформация	остаточная деформация	наибольшая пластическая деформация	остаточная деформация	наибольшая пластическая деформация	остаточная деформация	наибольшая пластическая деформация	остаточная деформация	наибольшая пластическая деформация	остаточная деформация	наибольшая пластическая деформация	остаточная деформация	наибольшая пластическая деформация	остаточная деформация
0,1	0,05	0,02	0,15	0,02	0,01	0,05	0	0,48	0,78	1,36	0,62	0,08	0,00	0,20	0,0			
0,15	0,10	0,07	0,11	0,03	0,05	0,05	0,11	0,38	0,07	1,56	0,34	0,03	0,03	0,16	0,10			
0,20	0,04	0,04	0,06	0,05	0,09	0,05	0,02	0,40	0,24	1,05	0,60	0,06	0,05	0,16	0,06			
0,25	0,05	0,08	0,20	0,09	0,10	0,23	0,19	0,60	0,14	0,78	0,14	0,06	0,06	0,41	0,05			
0,30	0,12	0,11	0,25	0,21	0,16	0,11	0,25	0,79	1,28	1,40	0,46	0,06	0,10	0,17	0,06			
0,35	0,12	0,02	0,20	0,03	0,23	0,04	0,39	1,15	0,27	2,30	0,03	0,06	0,06	0,28	0,42			
0,40	0,19	0,19	—	—	0,20	0,17	0,22	2,36	1,15	3,61	1,54	0,12	0,15	0,50	0,95			
0,45	0,10	0,07	0,51	0,84	0,34	0,32	0,44	2,21	1,03	2,65	1,18	0,10	0,08	0,26	0,03			
0,50	0,10	0,04	0,54	0,20	0,37	0,03	0,19	1,64	0,85	3,65	0,57	0,11	0,06	0,32	0,10			
0,55	0,35	0,09	0,47	0,58	0,44	0,32	0,70	3,37	0,93	2,58	0,75	0,18	0,14	0,22	0,08			
0,60	0,27	0,46	0,59	0,80	0,74	0,45	0,57	2,76	1,53	2,07	0,29	0,11	0,02	0,43	0,08			
0,70	0,16	0,05	0,28	0,19	0,50	0,30	0,75	3,50	3,27	1,82	1,68	0,13	0,13	0,50	0,19			
0,80	0,17	0,08	0,34	0,22	0,79	0,73	1,17	0,94	1,07	2,86	1,90	0,21	0,21	0,46	0,27			
1,0	0,21	0,16	0,33	0,07	0,63	0,63	1,34	1,92	1,07	2,86	0,02	0,23	0,11	1,36	0,62			
1,2	0,17	0,13	0,31	0,13	0,51	0,47	1,41	6,72	0,52	17,76	9,77	0,46	0,46	1,46	1,46			
1,5	0,27	0,27	0,56	0,56	0,31	0,31	0,76	4,94	1,55	8,43	1,35	0,48	0,48	1,53	1,88			
2,0	0,26	0,26	0,59	0,59	0,25	0,25	0,47	7,75	5,82	13,65	9,62	0,61	0,61	2,85	2,85			
2,5	0,39	0,39	0,83	0,73	—	—	0,36	10,98	11,18	10,75	4,77	0,63	0,63	—	—			
3,0	0,19	0,17	0,69	0,16	0,39	0,31	0,81	8,45	6,43	8,34	1,30	0,85	0,85	—	—			

одном направлении, значения остаточных деформаций и наибольших пластических деформаций совпадают, а для жестких систем с несколькими циклами упруго-пластических деформаций, значения наибольших пластических деформаций в большинстве случаев больше, чем значения остаточных деформаций. На рис. 5 приведены спектры наибольших пластических и остаточных деформаций, т. е. их зависимости от периода свободных колебаний. Как видно из табл. 3 и спек-

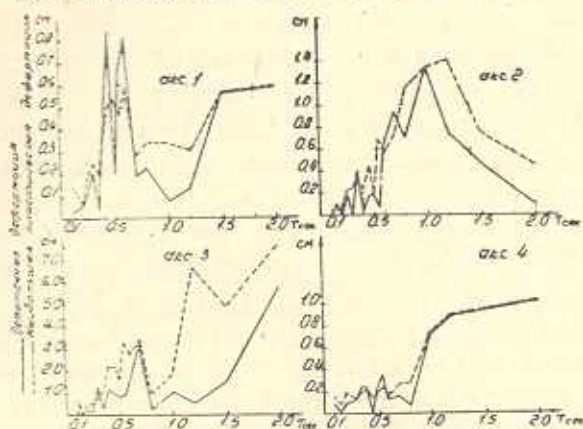


Рис. 5. Спектры наибольших пластических и остаточных деформаций.

тров значения остаточных деформаций, с увеличением периода свободных колебаний T растут. Остаточные и пластические деформации для жестких систем $0,1 \leq T \leq 0,6$ сек очень незначительны и составляют доли сантиметра. Это обстоятельство свидетельствует о том, что пластические свойства конструкции могут играть существенную роль особенно в жестких системах, так как в таких системах несмотря на очень раннее наступление предела упругости, остаточные деформации после землетрясения будут такими, которые в сооружении можно допускать без повреждений. Для малых значений T остаточные деформации мало зависят от акселерограмм. Наблюдается закономерность, согласно которой чем сильнее землетрясение, тем больше значения остаточных деформаций. С уменьшением значения γ остаточные и пластические деформации для $T > 0,5$ сек увеличиваются, а для $T < 0,5$ сек это не всегда имеет место. По характеру спектры остаточных деформаций при $\gamma = 0,7$ и $\gamma = 0,5$ мало отличаются друг от друга; заметные различия в спектрах получаются при $\gamma = 0,3$. Спектры остаточных деформаций по характеру очень сходны со спектрами максимальных перемещений [14]. Пиковые значения на спектрах получаются при значениях $0,5 < T < 1,0$ сек, тогда как на спектрах ускорений получались при $0,25 < T < 0,40$ сек. Для тех значений T , при которых на спектрах ускорений при упругих колебаниях получились пики, значения остаточных деформаций получились наименьшими. Это явление свидетельствует о большой роли пластических деформаций, так как за их счет пики на спектрах ускорений значительно сглаживаются без больших остаточных

деформаций в системе. Указанное явление, по-видимому, свидетельствует о том, что при определении ускорений в области упругих колебаний для этих значений периодов в системе имело место явление резонанса. В самом деле, при резонансе поведение системы в зоне нагрузки и первой пластической деформации, мало будет отличаться от поведения в зоне разгрузки и второй пластической деформации в обратном направлении. Поэтому, несмотря на большие пластические деформации при нагрузке и разгрузке в системе после одного цикла будут малые остаточные деформации. Большие остаточные и пластические деформации получаются в зоне изменения T от 0,7 до 1,2 сек. Для таких периодов, как показали исследования [13], ординаты спектров ускорений существенно снижаются, если учесть нелинейную зависимость между восстанавливающей силой и перемещением в упругой стадии.

В настоящей статье получен ответ на вопрос какие получаются остаточные и пластические деформации в системе если снижать значения максимальных ускорений. Другим, не менее важным обстоятельством является вопрос допустимы ли такие остаточные деформации или сооружение выйдет ли из строя при малейшей пластической деформации? Для жестких сооружений значения остаточных деформаций получились настолько незначительными, что, по-видимому, без большого риска на поставленный вопрос можно ответить положительно. Однако, всестороннее изучение этого вопроса нуждается также в экспериментальной проверке.

ЛИСМ

Поступило 28.IV 1964

Է. Ե. ԽԱՉՅԱՆ

ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔՆԵՐԻ ՍԵՅՄՄԱԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿ
ԱՌԱՋԳԱ-ՊԼԱՍՏԻԿ ԳԵՅՈՐԾՍՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՈՒՄՈՎ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հոդվածում բերված է ոժեղ երկրաշարժների աքսելերոգրամների հիման վրա կառուցվածքների սեյսմակալունեության հաշվարկը՝ առաձգա-պլաստիկ դեֆորմացիաների հաշվառմամբ: Վերականգնող ուժի և տեղափոխությունների կապը վերցված է նկ. 1-ցույց տված Պրանգտլի դիագրամայի օրինաչափությունը: Տարբեր էտապներում շարժման (5), (8), (10) և (13) դեֆերենցիալ հավասարումները ինտեգրված են էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի օգնությամբ: Ստացված արդյունքները համեմատության մեջ են դրվում միայն առաձգական հաշվարկման տվյալների հետ: Յուրջ է տրված, որ պլաստիկ դեֆորմացիաները չնչին ազդեցություն են անկնուժ սխեմեի մաքսիմալ տեղափոխությունների վրա, իսկ մաքսիմալ արագացումները զգալիորեն փոքրանում են: Ազդուսակի 3 բերված են սխեմեում առաջացած ամենամեծ պլաստիկ և մնացորդային դեֆորմացիաների արժեքները, սխեմեի ազատ ճոճման պարբերության և պլաստիկության գործակիցի տարբեր արժեքների

դիվերտ: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, որ կոշտ կառուցվածքների համար պլաստիկ և մասցորդալին դեֆորմացիաների արժեքները համեմատաբար փոքր են, որոնք կառուցվածքը կարող են թուլատրել ասանց էական քախվալաների: Աշխատանքի արդյունքները ցույց են տալիս, որ պլաստիկ դեֆորմացիաների հաշվառումով հաշվարկումները կարող են բացահայտել կառուցվածքի կրողունակության զգալի պաշարները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гольденблат И. И., Быховский В. А. Некоторые вопросы расчета и конструирования сборных железобетонных конструкций для сейсмических районов. В сборнике „Вопросы расчета конструкций жилых и общественных зданий со сборными элементами“. Госстройиздат, 1958.
2. Гольденблат И. И. Перспективы развития теории сейсмостойкости. В сборнике „Снижение стоимости и улучшение качества сейсмостойкого строительства“. Госстройиздат, 1961.
3. Гольденблат И. И., Николаенко И. А. Расчет конструкций на действие сейсмических и импульсивных сил. Госстройиздат, 1961.
4. Дарбинян С. С. К вопросу колебания системы с одной степенью свободы с учетом упруго-пластических деформаций. „Известия АН Армянской ССР“ (серия ТН), т. XII, № 1, 1959.
5. Завриев К. С. Задачи в области сейсмостойкого строительства промышленных зданий и сооружений. В сборнике „Снижение стоимости и улучшение качества сейсмостойкого строительства“. Госстройиздат, 1961.
6. Карапетян Б. К., Назаров А. Г. Экспериментальные методы исследования в области инженерной сейсмологии и сейсмостойкости сооружений. В сборнике „Снижение стоимости и улучшение качества сейсмостойкого строительства“. Госстройиздат, 1961.
7. Карцивадзе Г. Н., Медведев С. В., Напетварадзе Ш. Г. Сейсмостойкое строительство за рубежом. Госстройиздат, 1962.
8. Карцивадзе Г. Н. Вопросы динамического расчета сооружений за пределами упругости применительно к задаче сейсмостойкости. Тр. объединенной научной сессии институтов строительных материалов и сооружений Закавказских республик. Ереван, 1961.
9. Рабинович И. М. К динамическому расчету сооружений за пределом упругости. В сборнике „Исследование по динамике сооружений“. Госстройиздат, 1947.
10. Танабаси Р. Исследование нелинейных колебаний сооружений, подверженных воздействию разрушительных землетрясений. В сборнике „Международная конференция по сейсмостойкому строительству“. Госстройиздат, 1961.
11. Хаузнер Дж. Расчет сооружений на сейсмическое воздействие по предельному состоянию. Там же.
12. Хачиян Э. Е. Расчет сооружений на сейсмостойкость по акселерограммам сильных землетрясений (Сообщение 1). „Известия АН Армянской ССР“ (серия ТН), т. XV, № 3, 1962.
13. Хачиян Э. Е. К изучению нелинейных колебаний сооружений при сильных землетрясениях. ДАН Армянской ССР, т. XXXVI, № 4, 1963.
14. Хачиян Э. Е. Расчет сооружений на сейсмостойкость по акселерограммам сильных землетрясений (Сообщение 3). „Известия АН Армянской ССР“ (серия ТН), т. XVII, № 1, 1964.
15. Чачава Т. И. Энергетический метод исследования упругопластических колебаний. Сообщения АН Грузинской ССР, т. XXX, № 6, 1963.