

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

С. С. Дарбинян

Об учете затухания и упрочнения при расчете сооружений на сейсмические воздействия за пределом упругости

(Представлено академиком АН Армянской ССР А. Г. Назаровым 14/III 1967)

В ^(1,2) при исследовании спектров максимальных ускорений, перемещений и остаточных деформаций затуханием сооружения пренебрегали и, следовательно, принимали $\alpha = 0$. Такое допущение было связано с тем, что при упруго-пластических колебаниях предполагалась потеря энергии за счет затухания малой по сравнению с потерей энергии из-за появления пластических деформаций.

Для полного выяснения этого вопроса нами была решена также задача колебания системы с одной степенью свободы по акселерограммам сильных землетрясений интенсивностью 7 и 8 баллов в случае, когда $\alpha \neq 0$. Решение осуществлялось с помощью ЭВ машины.

Упруго-пластические свойства системы принимаются по закону линейного упрочнения¹.

Задача решена на основании формул ^(1,2), для 20 значений периода собственных колебаний от 0,15 до 3,0 сек. Вычисления произведены для затуханий $\alpha = 0,12$ при $0,15 \leq T \leq 1,0$ сек. и $\alpha = 0,08$ при $1,0 < T \leq 3,0$ сек. Такие значения α отвечают декрементам затухания соответственно $\delta = 0,37$ и $\delta = 0,24$.

Программа вычислений была составлена таким образом, что были получены величины смещений и ускорений с соответствующими моментами времени в точках перехода диаграммы «сила — перемещение» и значения остаточных деформаций после каждого полуцикла колебаний ⁽¹⁾. На основании этих данных определялись максимальные значения ускорений, перемещений и остаточных деформаций.

Сперва была решена упругая задача, т. е. когда $\psi = 1,0$. При решении упруго-пластической задачи рассматривался случай, когда коэффициент пластичности $\eta = 0,5$, а коэффициент упрочнения $\psi = 0,5$.

Полученные значения максимальных ускорений и перемещений для чисто упругого и упруго-пластического решений при $\alpha \neq 0$ приведены в табл. 1. На основании результатов, приведенных в ^(1,2) и

¹ Подробное изложение метода постановки и решения задачи приведено в ^(1,2).

Таблица 1

Значения максимальных ускорений в $\frac{\text{см}}{\text{сек}^2}$ и перемещений в см при $\alpha \neq 0$

$T \backslash \psi$		Землетрясение № 1				Землетрясение № 2				Землетрясение № 3				Землетрясение № 4			
		x^{max}		$\ddot{z}^{\text{max}}$		x^{max}		$\ddot{z}^{\text{max}}$		x^{max}		$\ddot{z}^{\text{max}}$		x^{max}		$\ddot{z}^{\text{max}}$	
		1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
0,15		0,11	0,11	195,0	161,6	0,15	0,19	264,8	197,0	0,23	0,20	411,0	276,4	0,09	0,10	154,6	130,1
0,2		0,25	0,40	250,4	184,6	0,25	0,30	248,8	200,8	0,59	0,61	579,0	461,6	0,23	0,25	225,9	183,4
0,25		0,43	1,30	270,6	207,3	0,43	0,36	270,8	208,0	0,98	0,98	616,6	499,9	0,33	0,28	210,5	148,8
0,3		0,47	0,22	195,0	156,9	0,88	0,76	383,4	280,2	1,61	1,67	707,1	548,3	0,32	0,30	140,4	103,0
0,35		0,63	0,53	193,9	148,0	1,31	1,08	422,3	286,9	2,39	2,06	769,9	563,2	0,46	0,48	148,4	107,3
0,4		0,58	0,60	129,7	110,4	1,08	0,84	265,7	180,2	2,92	3,52	719,0	603,2	0,39	0,47	96,9	79,8
0,45		0,46	0,64	89,2	81,0	1,42	1,15	277,1	193,9	4,00	3,82	779,7	579,7	0,55	0,43	108,0	69,4
0,5		0,62	0,78	97,1	76,2	1,78	1,44	280,3	199,3	4,08	4,48	643,0	509,1	0,63	0,55	98,7	72,3
0,6		1,44	1,31	160,5	105,7	1,63	1,52	178,4	126,1	5,52	5,07	604,5	455,1	0,72	0,55	78,5	52,5
0,7		0,94	0,74	75,6	52,4	1,45	1,33	116,9	88,6	6,00	5,16	483,0	335,5	0,80	0,87	64,2	46,2
0,8		0,86	0,78	53,0	37,8	2,16	1,99	132,8	101,9	4,21	3,44	259,4	172,9	1,04	0,81	64,3	43,7
0,9		0,69	0,84	33,4	26,1	2,61	2,21	127,2	87,9	3,65	3,85	176,8	138,5	0,98	0,80	47,6	33,5
1,0		0,68	0,69	26,7	20,4	2,61	2,70	103,1	79,9	3,38	3,27	129,8	98,7	1,00	1,01	39,3	29,7
1,2		0,62	0,63	16,9	12,9	2,14	2,10	58,6	44,5	2,89	4,24	79,3	71,1	1,36	1,45	37,2	29,2
1,4		0,93	1,00	18,6	14,7	2,34	2,23	47,3	33,2	5,96	6,12	119,4	100,2	1,60	1,67	32,2	24,9
1,6		1,04	1,10	16,0	12,5	2,12	2,16	32,6	23,2	9,74	9,65	151,0	116,2	1,73	1,78	26,6	20,4
1,8		1,09	1,14	13,3	10,3	1,74	1,57	20,5	14,9	13,26	12,58	161,4	118,5	1,78	1,86	21,7	16,8
2,0		1,25	1,31	12,1	9,5	1,96	1,16	19,3	12,5	13,90	13,97	137,0	105,4	1,84	1,93	18,2	14,1
2,5		1,72	1,78	10,8	8,3	1,61	1,59	10,3	7,6	17,09	18,36	107,7	85,8	1,98	2,03	12,5	9,5
3,0		2,15	1,83	9,4	6,4	1,84	1,86	8,1	6,1	18,43	17,12	80,8	60,1	2,67	2,96	11,7	9,4

табл. 1, приходим к выводу, что затухание заметно влияет на величины максимальных ускорений в сторону их уменьшения. Это влияние увеличивается особенно для жестких сооружений, т. е. для малых значений T . Как и следовало ожидать, учет затухания мало влияет на величины ускорений для гибких сооружений (при $T > 0,9$ сек). Такое явление, по-видимому, имеет место потому, что в гибких сооружениях развиваются большие пластические деформации и, следовательно, образуется петля гистерезиса, площадь которой во много раз превышает площадь петли гистерезиса, полученной из-за внутреннего трения (затухания).

Для отдельных значений периода собственных колебаний учет затухания приводит к уменьшению максимального ускорения в два раза. Так, например, для $T = 0,37$ сек при землетрясениях № 2 и 3.

Помимо заметного влияния затухания на величины максимальных ускорений вычисления показывают, что влияние затухания на величины максимальных перемещений и особенно остаточных деформаций сильно уменьшается. Лишь для некоторых значений T оно становится заметным. Так, например, при $T = 0,6$ сек, для землетрясения № 1 и при $T = 1,0$ сек, для землетрясения № 2. Однако известно, что при чисто упругих колебаниях затухание сильно влияет на значения перемещений.

Данные, приведенные в (1,2) и табл. 1, дают возможность установить, одинаково ли влияет затухание на определяемые величины при упруго-пластическом и при чисто упругом решении рассматриваемой задачи. Для выяснения этого вопроса были сопоставлены упругие решения при $\alpha = 0$ и $\alpha \neq 0$ с соответствующими упруго-пластическими решениями при тех же значениях α . Выяснилось, что влияние затухания на величину максимальных ускорений при чисто упругих колебаниях больше, чем при упруго-пластических колебаниях. В отдельных случаях ускорения отличаются в 1,5–1,7 раза.

Проведенные исследования показывают, что при определении абсолютных значений максимальных ускорений (сейсмических сил) следует учитывать влияние затухания. Но представляет также интерес выяснить, можно ли не учесть затухание для целей определения влияния пластических деформаций на величины максимальных ускорений в процентном отношении, т. е. при определении отношений

$$\frac{\tau_{\text{пл}}^{\text{max}}}{\tau_{\text{упр}}^{\text{max}}} \text{ к } \tau_{\text{упр}}^{\text{max}}.$$

Сопоставление их значений (табл. 2) показывает, что отношения $\frac{\tau_{\text{пл}}^{\text{max}}}{\tau_{\text{упр}}^{\text{max}}}$ при $\alpha = 0$ и при $\alpha \neq 0$ мало отличаются друг от друга. Поэтому с точки зрения установления степени влияния пластических деформаций на величины максимальных ускорений можно принимать $\alpha = 0$. Однако отметим, что для определения абсолютных значений сейсмических сил при упруго-пластических колебаниях нельзя пренебречь затуханием.

При изучении поведения сооружений под сейсмическими воздействиями, большинство авторов пренебрегают упрочнением мате-

риала и считают, что связь между напряжением и деформацией характеризуется диаграммой Прандтля. Такое допущение, помимо упрощения задачи, по нашему мнению, может привести к большим погрешностям и не может дать истинную картину колебаний сооружения.

Таблица 2

Отношение $\tau_{\text{пл}}^{\text{max}}$ (при $\eta = \psi = 0,5$) к $\tau_{\text{упр}}^{\text{max}}$

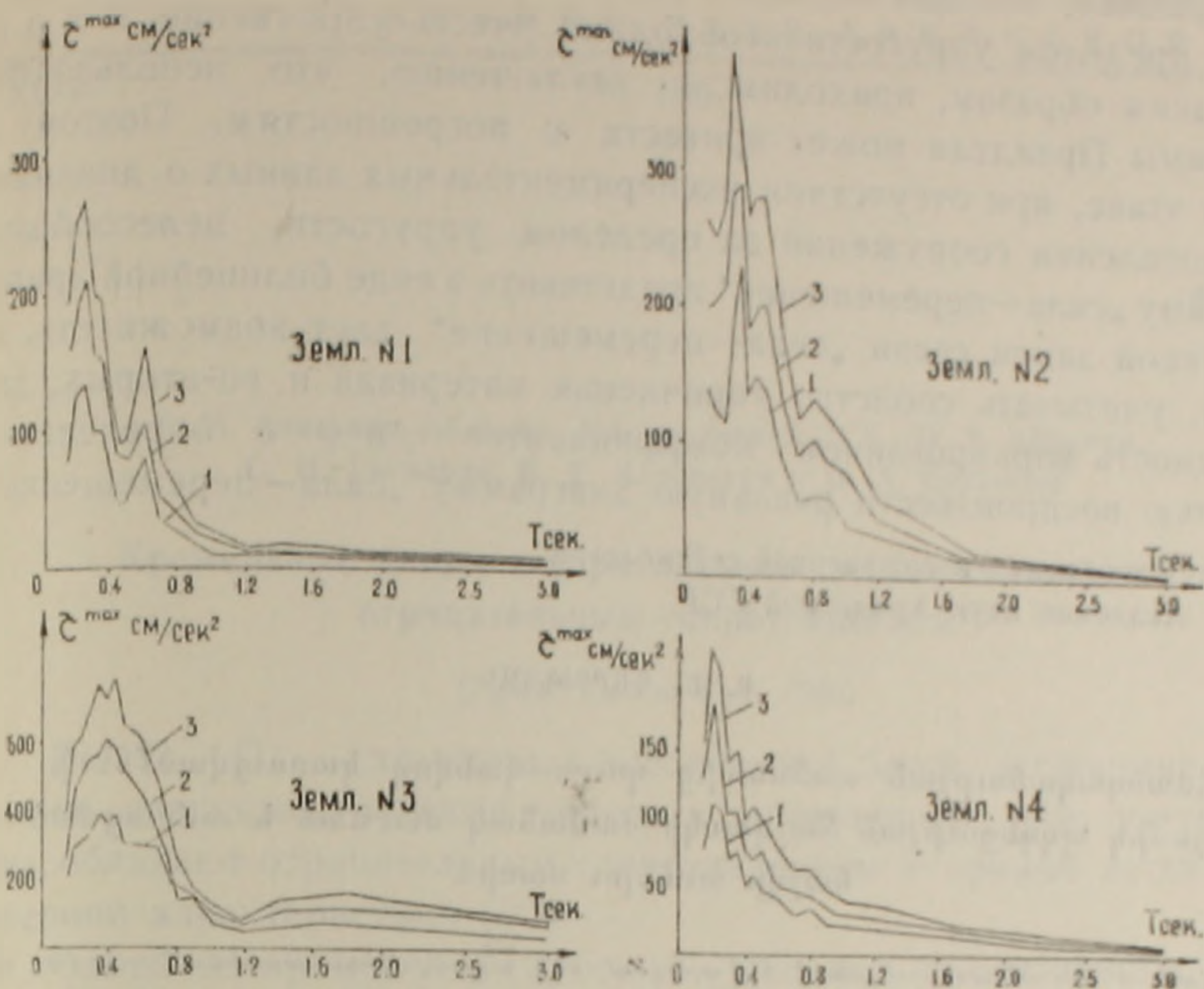
T	Землетрясен. № 1		Землетрясен. № 2		Землетрясен. № 3		Землетрясен. № 4	
	$\alpha=0$	$\alpha \neq 0$	$\alpha=0$	$\alpha \neq 0$	$\alpha=0$	$\alpha \neq 0$	$\alpha=0$	$\alpha \neq 0$
0,15	0,65	0,82	0,67	0,74	0,60	0,67	0,70	0,84
0,2	0,68	0,73	0,63	0,80	0,63	0,79	0,75	0,81
0,25	0,76	0,76	0,57	0,76	0,65	0,82	0,63	0,70
0,3	0,65	0,80	0,63	0,74	0,63	0,77	0,73	0,72
0,35	0,59	0,76	0,59	0,68	0,66	0,73	0,70	0,72
0,4	0,73	0,85	0,68	0,69	0,71	0,84	0,75	0,82
0,45	0,76	0,90	0,69	0,70	0,61	0,74	0,72	0,64
0,5	0,78	0,78	0,56	0,71	0,70	0,80	0,65	0,73
0,6	0,62	0,65	0,62	0,70	0,63	0,75	0,66	0,66
0,7	0,80	0,69	0,82	0,75	0,63	0,69	0,71	0,71
0,8	0,68	0,70	0,70	0,76	0,67	0,66	0,68	0,68
0,9	0,73	0,78	0,82	0,69	0,68	0,78	0,63	0,70
1,0	0,75	0,76	0,75	0,77	0,76	0,76	0,68	0,75
1,2	0,74	0,76	0,69	0,75	0,85	0,89	0,78	0,79
1,4	0,78	0,74	0,67	0,70	0,84	0,84	0,74	0,79
1,6	0,77	0,77	0,69	0,71	0,74	0,76	0,68	0,76
1,8	0,50	0,77	0,78	0,72	0,66	0,74	0,72	0,77
2,0	0,57	0,78	0,70	0,65	0,69	0,77	0,77	0,77
2,5	0,76	0,76	0,74	0,73	0,76	0,80	0,74	0,76
3,0	0,71	0,67	0,74	0,75	0,74	0,74	0,79	0,80

Для выяснения степени влияния упрочнения на величины максимальных ускорений, перемещений и остаточных деформаций полученные нами результаты были сопоставлены с данными Э. Е. Хачияна (³), который в основу своих исследований положил диаграмму Прандтля. Некоторые результаты сопоставлений спектров максимальных ускорений, максимальных перемещений и остаточных деформаций показаны на фиг. 1 и 2. На фиг. 1 приводится также упругое решение. Легко заметить, что учет упрочнения ($\psi \neq 0$) приводит к заметному увеличению значений максимальных ускорений.

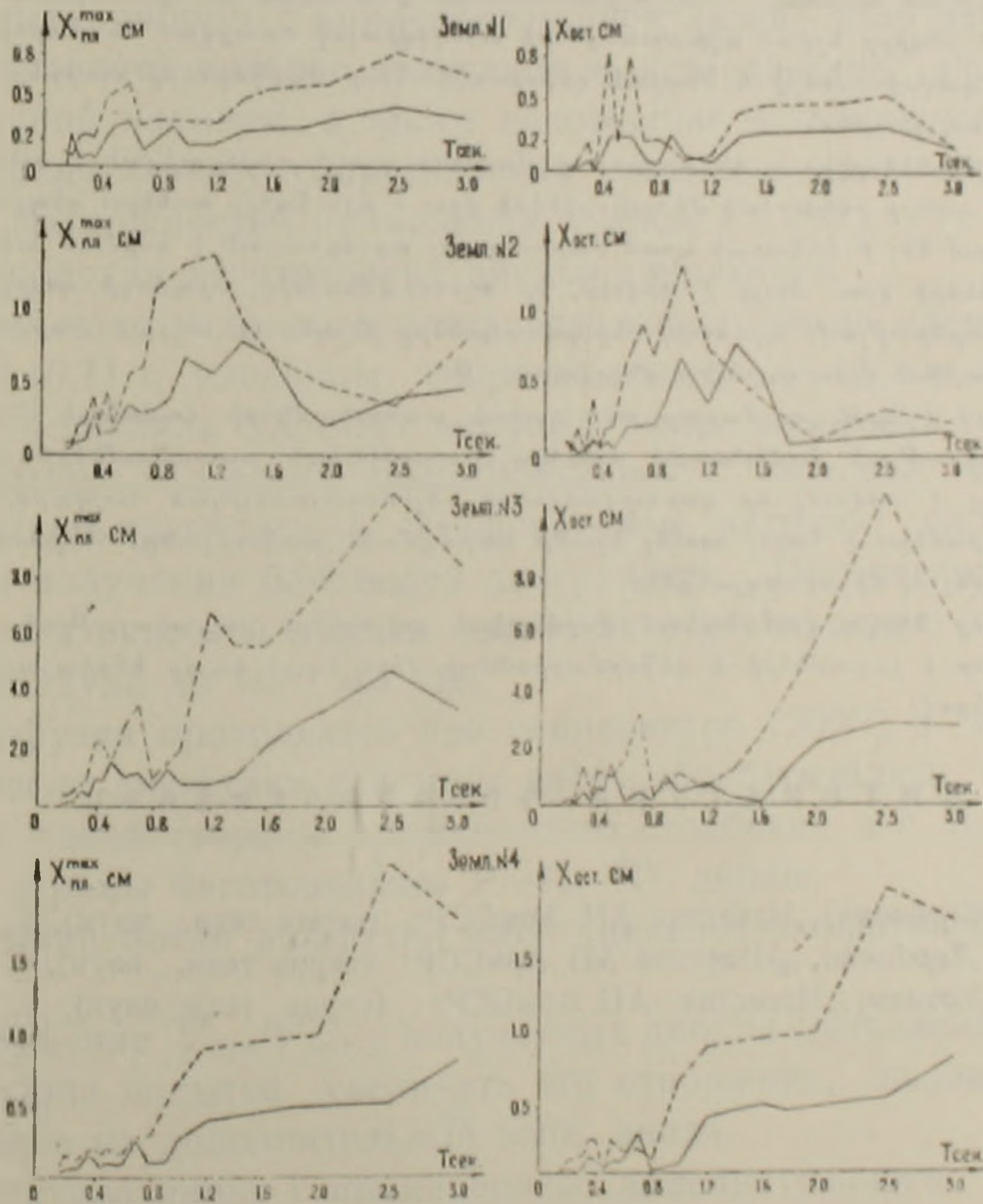
Анализ этих спектров показывает, что во сколько раз ускорение уменьшается при $\psi = 0,5$ по отношению к упругому решению, почти во столько же раз оно уменьшается при $\psi = 0$ по отношению к случаю $\psi = 0,5$.

Следовательно, решение упруго-пластических задач по диаграмме Прандтля приводит к искусственному уменьшению сейсмических сил, поэтому расчет сооружений под сейсмическими воздействиями следует производить с учетом упрочнения.

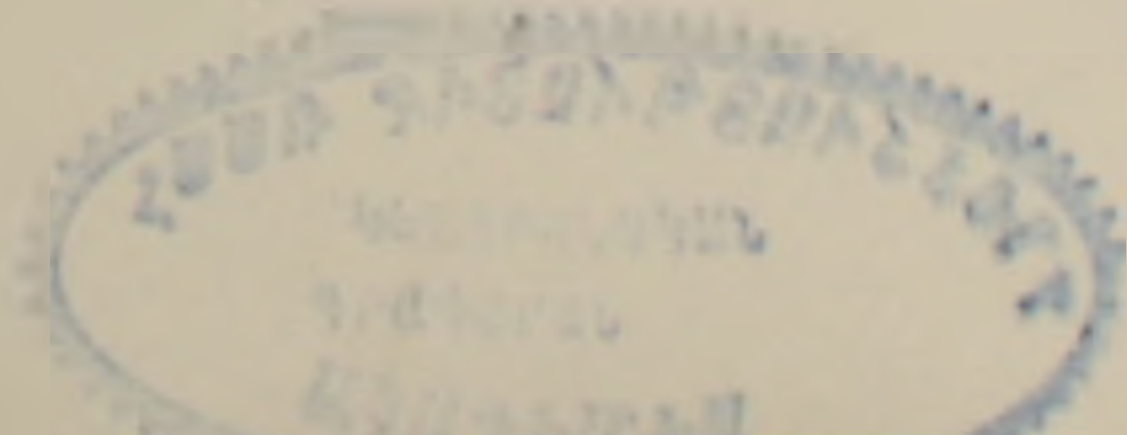
С другой стороны, из фиг. 2 видно, что пренебрежение явлением упрочнения ($\psi = 0$) приводит к сильному увеличению максимальных пластических и остаточных деформаций. Этот факт вторично



Фиг. 1. Графики зависимости максимальных ускорений от упрочнения при $\eta = 0,5$; $\alpha \neq 0$; 1— $\psi = 0$; 2— $\psi = 0,5$; 3— $\psi = 1,0$.



Фиг. 2. Графики зависимости максимальных пластических и остаточных деформаций от упрочнения при $\eta = 0,5$, $\alpha \neq 0$ (— — — $\psi = 0$, — $\psi = 0,5$).



подтверждает, что для изучения действительного поведения сооружений за пределом упругости необходимо учесть упрочнение.

Таким образом, приходим к заключению, что использование диаграммы Прандтля может привести к погрешностям. Поэтому на данном этапе, при отсутствии экспериментальных данных о динамическом поведении сооружений за пределом упругости, целесообразно диаграмму „сила—перемещение“ представить в виде билинейной кривой.

Такой закон связи „сила—перемещение“ дает возможность, во-первых, учитывать свойство упрочнения материала и, во-вторых, дает возможность варьированием коэффициентов η и ψ с определенной точностью воспроизвести реальную диаграмму „сила—перемещение“.

Институт геофизики и инженерной сейсмологии
Академии наук Армянской ССР

Ս. Ս. ԳԱՐԲԵՆՅԱՆ

Առաձգականության սահմանից դուրս գտնվող կառուցվածքների սեյսմիկ ազդեցության հաշվարկի ժամանակ մարման և ամրացման հաշվի առնելու մասին

Հոդվածում ուսումնասիրության է ենթարկվում մեկ ազատության առտիճան ունեցող սիս-տեմի տատանումները առաձգա-պլաստիկական ղեֆորմացիաների հաշվառումով, 7 և 8 բալ ում ունեցող երկրաշարժերի ազդեցության տակ:

Ի տարբերություն նախորդ (1, 2) աշխատանքների ընդունվում է, որ մարման գործակիցը $\alpha \neq 0$: Հուժեղով խնդիրը նշված աշխատանքների անալոգիայով ստացված են մարսիմում արա-զացումների, տեղափոխումների և մնայուն ղեֆորմացիաների սպեկտրները տարբեր երկրաշար-ժերի ազդեցության դեպքում:

Հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ մարումը դպալի ազդեցություն է ունենում մար-սիմում սեյսմիկ ուժերի բացարձակ մեծությունների վրա և այն հաշվի առնելու դեպքում սեյսմիկ ուժերը փոքրանում են: Ի հակառակ դրան մարումը քիչ ազդեցություն է գործում տեղափոխում-ների մեծությունների վրա: Ցույց է տրվում, որ այնուամենայնիվ, որպեսզի պարզաբանել թե սոկոսային հարարերությամբ պլաստիկ ղեֆորմացիաները ինչպես են ազդում մարսիմում ախա-զացումների մեծության վրա, կարելի է ընդունել $\alpha = 0$:

Ապացուցվում է նաև, որ մարումը առաձգական տատանումների ժամանակ մարումը ունի ուղիղի մեծ ազդեցություն համեմատած առաձգա-պլաստիկական տատանումների դեպքի հետ: Հոդվածում ցույց է տրվում, որ կառուցվածքների սեյսմոկայունության հաշվարկի ժամանակ անպայման անհրաժեշտ է հաշվի առնել նյութի ամրացման հատկությունը, հակառակ դեպքում կարող են ստացվել ոչ ճիշտ արդյունքներ:

Նշվում է, որ ներկա ժամանակում փորձնական տվյալների բացակայության պատճառով նպատակահարմար է լարումների և ղեֆորմացիաների միջև եղած կապը ներկայացնել գծային ամրացման օրենքով:

Л И Т Е Р А Т У Р А — Գ Ր Ա Կ Ա Ն Ո Ւ Յ Ո Ւ Ն

- ¹ С. С. Дарбинян, „Известия АН АрмССР“ (серия техн. наук), т. XIX, № 3 (1966). ² С. С. Дарбинян, „Известия АН АрмССР“ (серия техн. наук), т. XIX, № 6 (1966). ³ Э. Е. Хачиян, „Известия АН АрмССР“ (серия техн. наук), т. XVII, № 4 (1964).