

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

А. П. КИРИЛЛОВ, А. В. МИНАСЯН

ВОЗДЕЙСТВИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ТОЛЧКОВ И УДАРОВ
 НА КОМБИНАЦИОННО-СЕЙСМОАДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ

Комбинационно-сейсмоадаптивными системами являются сооружения и конструкции, которые оснащены комбинационными адаптивными элементами, часть из которых в процессе сильных землетрясений способна хрупко скачкообразно разрушаться, а другая часть — попрежидаться вследствие развития пластических деформаций [1, 2]. В наружных частях сооружений в качестве комбинированных систем могут быть использованы декоративные панели из бетона, керамзитобетона, пластмассы, эпителлина, а также их сочетания. Для этих целей также можно применять декоративные решетки, диагональные раскосы и растяжки. Панельные элементы, раскосы, жесткие ребра и т. д. могут быть применены в зонах сжатия.

В настоящей работе исследуется поведение комбинационно-сейсмоадаптивных АЭС под действием сейсмических толчков и ударов. При сильных и разрушительных землетрясениях движение почвы совершается прерывно, с резким изменением ускорения и скорости колебания (рис. 1). Землетрясения в г. Скопле (1963), Ташкенте (1966) и др. представляли собой последовательные повторные толчки [1, 2]. Явления толчка и удара связаны с возникновением свободных колебаний.

Пусть при землетрясении с момента времени $p\tau_i = \tau^*$ по τ^* (причем, $\tau_i^* - \tau - 0$) действует сейсмический толчок. Уравнение движения в координатах Лагранжа второго рода можно представить в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^N (\Phi_{ik}^0)^2 M_i Q_k(\xi_p) + B_k^* Q_k(\xi_p) = - \sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i \ddot{Q}_0(\xi_p); \quad (1)$$

$$p\tau < \tau^*, \quad (2)$$

где Φ_{ik}^0 — собственные функции; M_i — точечные массы; $Q_k(\xi_p)$ — собственный вектор; B_k^* — начальная жесткость; p — номер шага по времени; $Q_0(\xi_p)$ — заданная сейсмологическая информация.

Рассмотрим три случая. В первом случае система претерпевает толчок в связи с прерывностью внешних сил, тогда уравнение (1) при $p\tau > \tau^*$ принимает вид:

$$\sum_{i=1}^N (\Phi_{ik}^0)^2 M_i \ddot{Q}_k(\xi_p) + B_{ik}^* Q_k(\xi_p) = - \sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i [\ddot{Q}_0(\xi_p) + \delta Q_0]. \quad (3)$$

где δQ_0 характеризует прерывность внешних сил, а B_k^* — жесткость после переходного процесса.

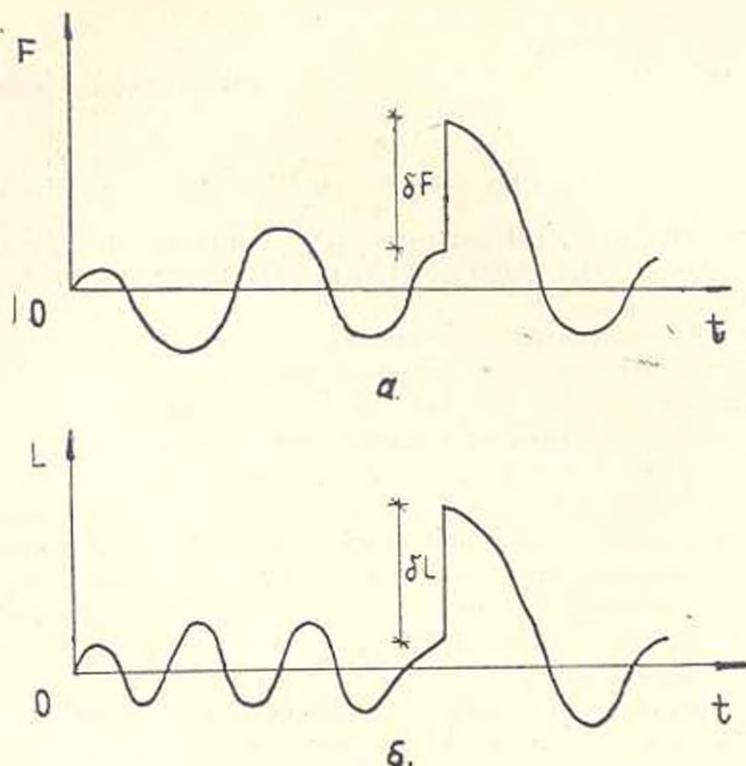


Рис. 1. Образование импульсов: а) случай сейсмического толчка; б) случай сейсмического удара.

Здесь можно выделить 2 процесса колебания:

- а) не включаются пластические шарниры в связях типа j^* ;
- б) включаются пластические шарниры.

В первом случае колебания имеем:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} B_k^*(\xi_p) = B_k^*. \quad (4)$$

Во втором случае толчок вызывает включение пластических шарниров:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} B_k^*(\xi_p) = B_k^* - \delta B_k.$$

Подставляя соотношение (4) в уравнение (3), получаем следующее выражение, характеризующее колебания системы:

$$\sum_{i=1}^N (\Phi_{ik}^0)^2 M_i \ddot{Q}_k(\xi_p) + (B_k^* - \delta B_k) Q_k(\xi_p) = - \sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i [\ddot{Q}_0(\xi_p) + \delta Q_0]. \quad (5)$$

Вычитая из уравнения (5) выражение (2), после преобразований получаем:

$$\varepsilon \ddot{Q}_0 = \varepsilon B_k^* Q_k(\xi_p) \left[\sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i \right]^{-1}; \quad (6)$$

$$\varepsilon \ddot{Q}_0 \left(\sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i \right) = \varepsilon B_k^* Q_k(\xi_p) = \varepsilon F. \quad (6')$$

Согласно [3] система претерпевает сейсмический удар, если величина импульса значительно возрастает за короткое время действия ускорения. Воспользуемся этим положением и введем иной характер сейсмического удара, для чего построим функцию Лагранжа $L = L(T, C)$, где \bar{T} — кинетическая энергия, \bar{C} — силовая функция.

Аналогично уравнению (4), кинетическую энергию представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{T} = & \sum_{i=1}^N \{0,5 (\Phi_{ik}^0)^2 M_i [\dot{Q}_k(\tau_i^*) + \dot{Q}_0(\tau_i^*) + \varepsilon \dot{Q}_k(\tau_i^*)]^2 + \\ & + \sum_{i=1}^N \{0,5 \Phi_{ik}^0 M_i [\dot{Q}_k(\tau_i^*) + \dot{Q}_0(\tau_i^*) + \varepsilon \dot{Q}_k(\tau_i^*)]^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Кинетическая энергия без учета импульсного эффекта будет

$$\begin{aligned} \bar{T} = & \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\Phi_{ik}^0)^2 M_i [\dot{Q}_k(\tau^*) + \dot{Q}_0(\tau^*)]^2 + \\ & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \Phi_{ik}^0 M_i [\dot{Q}_k(\tau^*) + \dot{Q}_0(\tau^*)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Силовая функция не изменяется:

$$\bar{C} = -\frac{1}{2} B_k^* (Q_k(\tau^*))^2. \quad (8')$$

Функцию Лагранжа получаем следующим образом:

$$\begin{aligned} L = L(\bar{T}, \bar{C}) = & \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\Phi_{ik}^0)^2 M_i [\dot{Q}_k(\tau^*) + \dot{Q}_0(\tau^*)]^2 + \\ & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \Phi_{ik}^0 M_i [\dot{Q}_k(\tau^*) + \dot{Q}_0(\tau^*)] - \frac{1}{2} B_k^* Q_k^2, \end{aligned} \quad (9)$$

а с учетом импульсного эффекта —

$$\begin{aligned} L_1 = L_1(\bar{T}, \bar{C}) = & \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\Phi_{ik}^0)^2 M_i [\dot{Q}_k(\tau_i^*) + \dot{Q}_0(\tau_i^*) + \varepsilon \dot{Q}_k]^2 + \\ & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \Phi_{ik}^0 M_i [\dot{Q}_k(\tau_i^*) + \dot{Q}_0(\tau_i^*) + \varepsilon \dot{Q}_k]^2 - \frac{1}{2} B_k^* Q_k^2; \end{aligned} \quad (9')$$

$$\delta L = L_1 - L = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\Phi_{ik}^0)^2 M_i [\delta \dot{Q}_k^2 + 4\delta Q_k \dot{Q}_0]. \quad (10)$$

В этом случае: $\delta L = \delta \bar{T}$.

Рассмотрим выключение связей типа i^* за счет сейсмического удара. Предполагается, что движение почвы сопровождается скачком импульсного характера. Воспользуемся принципом получения функции Гамильтона. Приращение кинетической энергии в переходном процессе обусловлено выключением связей типа i^* , что сопровождается мгновенным снабдением потенциальной энергии. Как и в предыдущих случаях, время перераспределения энергии стремится к нулю. Учитывая эти положения, из функции Гамильтона получена вариация жесткости системы в переходном процессе

$$\delta B_k^* = 2[Q_k(\tau^*)]^{-2} \sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i [Q_k(\tau^*)] \delta Q_0(\tau^*) \quad (11)$$

или

$$\delta Q_0(\tau^*) = \delta B_k^* [Q_k(\tau^*)]^2 \left\{ \sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i [Q_k(\tau^*)] \right\}^{-1}. \quad (12)$$

Смещения определяются по формулам:

$$W_i = \sum_{k=1}^N \Phi_{ik} Q_k, \quad (13)$$

где Q_k — значение собственного вектора, которое определяется по данным [4].

Поперечные нагрузки соответственно в начальном и переходном процессах определяются

$$q_i = B_i (W_i - W_{i-1}); \quad q_{in} = B_i^n (W_i - W_{i-1}), \quad (14)$$

где B_i и B_i^n — жесткости в начальном и переходном процессах.

В таблице представлены результаты расчета ядерного реактора на сейсмостойкость при 8-балльных сейсмических ударах. Жесткость, масса и коэффициент сейсмоадаптации имеют следующие значения:

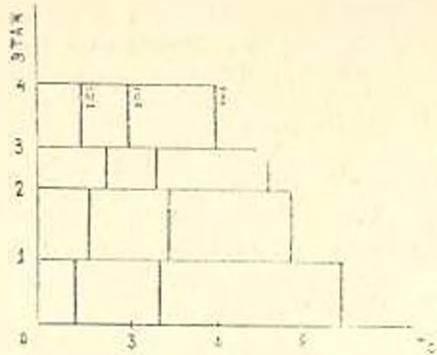
$$B = 6522 \frac{T}{\text{с.м}}; \quad M = 734 \frac{T\text{с}^2}{\text{м}}; \quad K = 1,75.$$

Таблица

Характеристика удара, с.м,с	Упругое смещение, с.м	Максимальное смещение, с.м	Сейсмическая сила (T)		
			без сейсмоадаптации	при разрушении элементов типа i^*	при разрушении элементов типа i^* и j^*
12,52	0,18	0,59	2741	2133	1320
19,07	0,27	1,03	4177	2460	1785

На рис. 2 изображены зависимости изменения сейсмических нагрузок по этажам внутреннего железобетонного каркаса АЭС. Жесткости этажей примерно идентичны, поэтому для каркаса приняты одинаковые характеристики жесткостей: $EI = 0,2 \cdot 10^{12} \text{ Н/см}^2$; $EF = 0,1 \cdot 10^{11} \text{ Н}$; поэтажные массы: $M_1 = 12 \cdot 10^4$; $M_2 = 14 \cdot 10^4$; $M_3 = 11,5 \cdot 10^4$; $M_4 = 18 \cdot 10^4 \text{ Н с}^2 \text{ см}^{-1}$. Сейсмические толчки и удары имеют интенсивность 8 баллов, а затухание системы определялось по данным [2].

Рис. 2. Характер изменения сейсмических сил по этажам внутреннего жб каркаса: I — без сейсмоадаптации; II — при однокомпонентной сейсмоадаптации; III — при комбинационной сейсмоадаптации.



Отношение жесткостей при учете влияния сейсмоадаптивных элементов и без учета их влияния назовем коэффициентом сейсмоадаптации, который в данном примере равен 1,75.

По данным исследования можно сделать следующие выводы. Система претерпевает удар, если:

- а) непрерывное движение почвы приводит к скачкообразному выключению связей, за счет чего в системе происходит перераспределение энергии;
- б) внешнее воздействие (скорость движения) дискретно и сопровождается мгновенным увеличением кинетической энергии. В последнем случае может не произойти выключения связей. Если они выключаются, то это обусловлено доведением системы предельного состояния под действием внешнего воздействия и удара;
- в) выявлено, что сейсмическая реакция комбинационно-сейсмоадаптивных сооружений в 2,5—3 раза меньше сейсмической реакции неадаптивных сооружений и в 1,5—2 раза меньше сейсмической реакции систем, оснащенных адаптивными элементами одного типа.

Ա. Պ. ԿԵՐԵՂՈՎ, Ա. Վ. ԽՆԱՍՅԱՆ

ՆԻԿԻՏՆԱՐԺԱՌԱԿԱՆ ՀԱՐՎԱԾՆԵՐԻ ԵՎ ՀՐՈՒՄՆԵՐԻ ԱՉԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ
ՆԻԿԻՏՆԱՐԺՈՒ ՀԱՐՄԱՐՎՈՂ ԶՈՒԳԱԿՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳՆԵՐԻ ՎՐԱ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Վ

Ստումնաիրվում է Երկրաշարժին հարմարվող զուգակցված համակարգերի վարքը Երկրաշարժի, հարվածների և հրումների ժամանակ: Դուրս են բեր-

ված բանաձևեր, որոնց միջոցով կարելի է որոշել նշված համակարգերի պարամետրերի փոփոխությունները անցումային ուժի մեծությունում: Ստացված են եզրակացություններ համակարգերում հարվածի և հրման երևույթների առաջացման վերաբերյալ, կախված հարմարվող կապերի բարձրությունից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кириллов А. П., Минасян А. В. Комбинационное повреждение сооружений и конструкций при динамических и сейсмических воздействиях — Строительство и архитектура, 1981, сер. 14, вып. 1, с. 20—23.
2. Минасян А. В. Динамика и эффективность комплексной сейсмоадаптации сооружений в приложении к атомным электростанциям: Автореф. Дис. ... канд. техн. наук.— Тбилиси, 1984.— 22 с.
3. Наларова А. Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил.— Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1959 — 286 с.
4. Кириллов А. П., Дирбинян С. С., Минасян А. В. Сейсмостойкость упруго-пластических систем с разрывными характеристиками.— ДАН АрмССР, 1982, т. LXXIV, № 2, 85—89.