

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

А. О. СААКЯН, Ю. Х. ГАЗАРЯН

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ С ЯДРАМИ ЖЕСТКОСТИ И ДЕМПФЕРНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В практике современного строительства широкое распространение получают многоэтажные здания с ядрами жесткости. С целью повышения их сейсмостойкости были предложены демпферные устройства, устанавливаемые между каркасом и ядром жесткости [1]. Имея в виду неизученность поведения таких систем, были проведены комплексные исследования [2, 3].

В статье излагается методика расчета многоэтажных зданий с ядрами жесткости и демпферными устройствами при гармонических и сейсмических воздействиях, апробированная проведенными авторами экспериментальными исследованиями. В соответствии с принятой расчетной схемой здания (рис. 1) с учетом сил внутреннего сопротивления

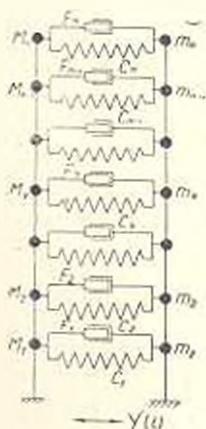


Рис. 1.

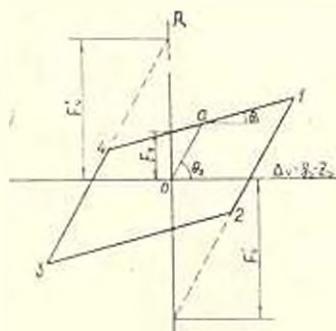


Рис. 2.

Рис. 1. Расчетная модель многоэтажного здания с упруго-демпферными устройствами между каркасом и ядром жесткости при горизонтальных динамических воздействиях.

Рис. 2. Петля гистерезиса системы упруго-демпферных устройств сухого трения с показанием расчетных параметров.

каркаса и ядра жесткости, а также реакции демпферов сухого трения, работу которых можно аппроксимировать в виде билинейной диаграммы (рис. 2), движение системы при сейсмическом воздействии можно описать следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} m_v \ddot{y}_v + \gamma_i \omega_i m_v \dot{y}_v + \sum_{j=1}^n r_{ij} y_j + P_i = -m_v \ddot{y}_0 \\ M_v \ddot{z}_v + \gamma_i \omega_i M_v \dot{z}_v + \sum_{j=1}^n R_{ij} z_j - P_i = -M_v \ddot{y}_0 \quad (v=1, 2, \dots, n), \end{cases} \quad (1)$$

где m_v, M_v — соответственно, сосредоточенные массы ядра жесткости v -го этажа; z_{ij}, R_{ij} — упругие реакции каркаса и ядра жесткости; y_v и z_v — прогибы каркаса и ядра жесткости на уровне v -го этажа; γ_i — коэффициент неупругого сопротивления многоэтажного здания без демпферных устройств при i -ом тоне колебаний; ω_i — собственная круговая частота i -го тона колебаний здания с демпферными устройствами; \ddot{y}_0 — ускорение основания здания.

В соответствии с рис. 2 реакция демпферов P_i при различных этапах циклического воздействия нагрузки можно представить следующими аналитическими выражениями:

$$P_i = \begin{cases} C_v (y_v - z_v) & \text{— на участке } 0 - a; \\ C_v (y_v - z_v) + F_v & \text{— на участке } a - 1; \\ C_v (y_v - z_v) - F_v & \text{— на участке } 1 - 2; \\ C_v (y_v - z_v) - F_v & \text{— на участке } 2 - 3; \\ C_v (y_v - z_v) + F_v & \text{— на участке } 3 - 4, \end{cases} \quad (2)$$

где $C_v = 1g\theta_v$, $C_v = 1g\theta_v$ — жесткости системы демпферов v -го этажа для различных участков нагружения и разгрузки; F_v, F_v, F_v — силы сухого трения на участках, показанных на рис. 2.

С учетом следующих обозначений:

$$\begin{aligned} \tau &= \omega_k t = \frac{2\omega_i}{\pi} t; \quad y_v = U_v; \quad \dot{y}_v = \omega_k \dot{U}_v; \quad \ddot{y}_v = \omega_k^2 \ddot{U}_v; \\ z_v &= V_v; \quad \dot{z}_v = \omega_k \dot{V}_v; \quad \ddot{z}_v = \omega_k^2 \ddot{V}_v; \\ \mu &= \frac{M}{m}; \quad \alpha_v = \frac{C_v}{m\omega_k^2}; \quad \omega_k = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{C_v l}{m}}; \\ \alpha_v' &= \frac{C_v'}{m\omega_k^2}; \quad \Delta_v = U_v - V_v \end{aligned} \quad (3)$$

и после несложного преобразования система дифференциальных уравнений (1) и выражение (2) примут вид:

$$\begin{cases} \ddot{U}_v + \gamma_i \tau_i \dot{U}_v + \mu^2 \sum_{j=1}^n r_{ij} U_j + P_i = -\ddot{y}_0; \\ \ddot{V}_v + \gamma_i \tau_i \dot{V}_v + \frac{6\mu^2}{l^2} \sum_{j=1}^n R_{ij} V_j - \frac{1}{\mu} \ddot{P}_i = -\ddot{y}_0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{P}_v = \frac{1}{2} \{ [1 + (-1)^{k_v}] \alpha_1 + [1 - (-1)^{k_v}] \alpha_2 \} \Delta_v + (\alpha_1 - \alpha_2) \sum_{k_v=-1}^{k_v-1} (-1)^{k_v} \Delta_v^{(k_v)} \quad (v=1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

Здесь k_v показывает номер узловой точки на петле гистерезиса, соответствующей v -му ярусу, и последовательно принимает значения $k_v = -1, 0, 1, 2, 3, \dots$ ($v = 1, 2, \dots, n$).

Прогибы ядра жесткости и каркаса определяются путем решения системы дифференциальных уравнений (4) при начальных условиях

$$U_v(0) = \dot{U}_v(0) = V_v(0) = \dot{V}_v(0) = 0 \quad (v=1, 2, \dots, n). \quad (6)$$

Особенностью системы дифференциальных уравнений (4) является то, что содержащиеся в нем члены P_v ($v = 1, 2, \dots, n$), являющиеся приведенными реакциями демпферов сухого трения, изменяют свои значения, связанные с работой системы на различных участках гистерезисной петли, и имеют вид, приведенный в (5).

Отметим, что система дифференциальных уравнений (4) содержит кусочно-линейные функции \bar{P}_v переменные во времени и учитывающие работу поэтажно установленных демпферов в различных фазах.

Для реализации этой, изменяющейся по времени, сравнительно сложной системы дифференциальных уравнений (4) была применена ЭВМ (БЭСМ-6) с использованием численного метода Рунге-Кутты.

Проектные разработки с проведением расчетно-теоретических исследований, применительно к 12-этажным зданиям типа «спаренный трилистник» с демпферными устройствами показали, что полученные разрешающие уравнения (4) можно существенно упростить, имея в виду, что масса ядра жесткости мала по сравнению с массой всего здания. При игнорировании массы ядра жесткости взамен системы уравнений (4), содержащих $2n$ дифференциальных уравнений второго порядка, получаем n уравнений того же порядка (n — число этажей здания).

Система дифференциальных уравнений (4) при $\mu = 0$ примет вид

$$\ddot{U}_v + \gamma_v \eta_v \dot{U}_v + n^2 \sum_{j=1}^n r_{vj} U_j + \bar{P}_v = -\ddot{y}_0; \quad (7)$$

$$\frac{6n^4}{D} \sum_{j=1}^n R_{vj} V_j = \bar{P}_v.$$

Обозначая для сокращения записи через

$$T_{k_v} = \frac{1}{2} \{ [1 + (-1)^{k_v}] \alpha_1 + [1 - (-1)^{k_v}] \alpha_2 \},$$

$$F_{k_v} = (\alpha_1 - \alpha_2) \sum_{k_v=-1}^{k_v-1} (-1)^{k_v} \Delta_v^{(k_v)}, \quad (8)$$

выражение \bar{P} , входящее в (7), в силу (5) будет иметь вид:

$$\bar{P} = T_k \Delta_k + E_k. \quad (9)$$

Подставляя это значение во второе уравнение системы (7), получим:

$$\frac{6n^4}{\lambda^2} \sum_{j=1}^n R_{kj}^0 V_j = T_k \Delta_k + E_k. \quad (10)$$

Имея ввиду, что $\Delta_k = U_k - V_k$, выражение (10) после преобразования примет вид:

$$\sum_{j=1}^n \left(\frac{6n^4}{\lambda^2} R_{kj}^0 + T_{kj} \varphi_{kj} \right) V_j = T_k U_k + E_k. \quad (11)$$

Вводя обозначения

$$\frac{6n^4}{\lambda^2} R_{kj}^0 + T_{kj} \varphi_{kj} = G_{kj},$$

из уравнения (11) находим прогибы ядра жесткости

$$V_j = \sum_{k=1}^n A_{kj} (T_k U_k + E_k) \quad (j = 1, 2, \dots, n), \quad (12)$$

где A_{kj} являются элементами обратной матрицы $\{G_{kj}\}^{-1}$.

Систему уравнений (7) в силу принятых выше обозначений можно представить в виде:

$$U_v + \gamma_{vv} \dot{U}_v + n^2 \sum_{j=1}^n r_{vj}^0 U_j + \frac{6n^2}{\lambda^2} \sum_{j=1}^n R_{vj}^0 V_j = -\ddot{y}_v \quad (v=1, 2, \dots, n). \quad (13)$$

Таким образом, задача определения прогибов каркаса U и ядра жесткости V на уровне v -го этажа сводится к решению системы дифференциальных уравнений (13) при начальных условиях (6) с учетом выражений (8) и (12).

В качестве примера практического применения разработанной методики приводятся результаты расчета 12-этажного здания с демпферными устройствами на гармонические и сейсмические воздействия. В расчете использованы опытные значения динамических характеристик, полученные при испытании 12-этажных зданий в натуре при жестком соединении каркаса и ядра жесткости. Жесткости α , силы сухого трения F и системы демпферов на уровне всех этажей приняты одинаковыми. В случае расчета здания на гармонические воздействия предполагается, что возмущающая сила приложена на уровне верха здания и по характеру действия идентична силе, развиваемой вибромашинной инерционным действием. Расчеты производились для первых трех тонов колебаний здания. Параметр α , характеризующий жесткость системы демпферных устройств, варьировался в пределах от $0,5 \div 200$, а F , ха-

рактически характеризующий величину силы сухого трения системы демпферов, в пределах от 1 ÷ 50 т.

На рис. 3 приведены амплитуды верхнего конца каркаса и ядра жесткости при установившихся колебаниях (основной тон) 12-этажного здания. Анализ кривых свидетельствует о высокой эффективности системы демпферных устройств сухого трения в отношении резкого уменьшения амплитуд при резонансных колебаниях каркасных зданий с ядром жесткости. С увеличением значения F амплитуды колебания каркаса и ядра жесткости в начале убывают, а затем, с некоторого значения F они резко возрастают и в пределе достигают величин, соответствующих жесткому соединению каркаса с ядром жесткости. Следовательно, для всех конечных значений α кривые имеют точки экстремума. Оптимальное значение силы сухого трения F падает с уменьшением величины α .

Аналогичная картина наблюдается при высших формах колебаний.

Расчетные прогибы каркаса и ядра жесткости по высоте здания при установившихся гармонических колебаниях и оптимальных значениях параметров демпферных устройств, а также для случая жесткого соединения каркаса и ядра, приведены на рис. 4. По этим кривым вид-

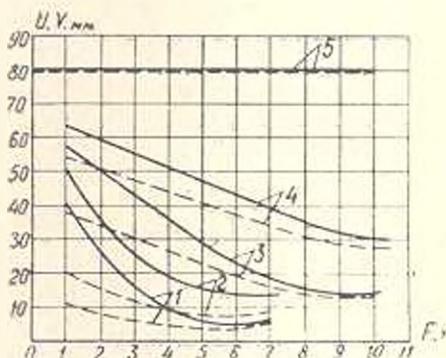


Рис. 3.

Рис. 3. Амплитуды колебаний верхнего конца каркаса U (сплошная линия) и ядра жесткости V (штрих-линия) 12-этажного здания при гармонических возмущениях (основной тон колебаний) в зависимости от силы сухого трения системы демпферов при значениях коэффициентов 1 — $\alpha = 0,6$; 2 — $\alpha = 1$; 3 — $\alpha = 3$; 4 — $\alpha = 6$; 5 — $\alpha \rightarrow \infty$.

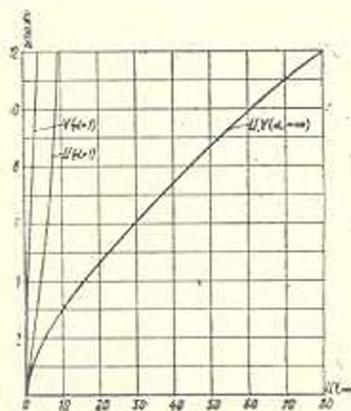


Рис. 4.

Рис. 4. Расчетные прогибы каркаса U и ядра жесткости V 12-этажного здания при установившихся гармонических колебаниях (основной тон) с демпферными устройствами при значениях параметра $Q = 10,6$ т, $\gamma = 2$, $\alpha = 1$, $\gamma = 0,04$, $F = 5,3$ т, и при жестком соединении ($\alpha \rightarrow \infty$)

но, что при жестком соединении каркаса и ядра жесткости амплитуда резонансных колебаний основного тона 12-этажного здания составляет 80 мм, а при применении системы демпферных устройств с выбранными оптимальными параметрами амплитуда колебаний каркаса и ядра жесткости равны, соответственно, $U = 13$ мм, $V = 7,5$ мм ($\alpha = 1$).

Расчет 12-этажного здания с демпферными устройствами был проведен также при различных акселерограммах землетрясений с целью выявления влияния демпферов на поведение зданий данной конструктивной системы.

В таблице приводятся значения максимальных амплитуд колебаний 12-этажного здания на уровне верха как при наличии и отсутствии демпферных устройств, так и при различных сейсмических воздействиях.

Таблица

Значение максимальных амплитуд сейсмических колебаний 12-этажного здания на уровне верхнего этажа при $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 10, \gamma = 2, F_0 = 3,75 \text{ м}$

Типы акселерограмм	Периоды колебаний акселерограмм, с	Здание с демпфером			Здание без демпфера (жесткое соединение)	
		Период первого тона колебаний, сек	Амплитуда колебания		период первого тона колебания, сек	амплитуда колебания $U, V, \text{ м.м}$
			каркаса $U, \text{ м.м}$	ядра жесткости $V, \text{ м.м}$		
36-7-Я (Япония, 14.II.1956)	0,8	—	52,5	17	—	53
13-7-A (Америка, 22. IX. 1952)	0,35	0,85	27	13	0,72	44

Анализ приведенных данных показывает, что при сейсмических воздействиях демпферные устройства существенно уменьшают амплитуды колебаний ядра жесткости.

Что же касается каркаса, не способного в данной конструктивной системе здания к восприятию значительной сейсмической нагрузки, его горизонтальные перемещения при наличии демпферных устройств получаются примерно такими же, как и при жестком соединении его с ядром жесткости.

ИЗКТИ

Поступило 11.X.1979

Ա. Օ. ՄԱՀԱԿՅԱՆ, Յ. Կ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

ԿՈՇՏՈՒԹՅԱՆ ՄԻՋՈՒԿՈՎ ԵՎ ՄԱՐԻԶ ՍԱՐՔԵՐՈՎ ԲԱՔԱՐԱՀԱՐԿ ԾԵՆՔԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ՀՈՐԻԶՈՆԱԿԱՆ ԴԻՆԱՄԻԿ ԱՋԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՏԱԿ

Ա մ փ ո փ ո մ

Աշխատանքում շարադրվում է կոշտության միջուկով և մարիչ սարքերով բարձրահարկ շենքերի հաշվարկային մեթոդը հարձույնի և սեյսմիկ ազդեցության դեպքերում:

Շենքի հաշվարկային սխեմային համապատասխան կազմված է սեյսմիկ տատանումների դիֆֆերենցիալ հավասարումների համակարգը, որտեղ հաշվի է առնված հիմնակմախքի և կոշտության միջուկի ներքին ուժերի դիֆադրուսիվները, ինչպես նաև շոր շփմամբ աշխատող մարիշների հակազդումը, որոնց աշխատանքը մոտարկված է հրկյծային դիսպրամի ձևով:

Դիֆֆերենցիալ հավասարումների համակարգի լուծումը իրացված է БЭСМ-6 տիպի էԷՄ-ի վրա, Ռունգե-Կուտի թվային եղանակի միջոցով:

Ստացված արդյունքների վերլուծմամբ ցույց է տրված մարիշ սարքերի օգտագործման բարձր էֆեկտիվությունը հիմնակմախքային շենքերի սեղանանային տատանման ամօլլիստոդի կորուկ իջեցման համար:

ЛИТЕРАТУРА

1. Տապյան Ա. Օ., Տապյան Ք. Օ., Գազարյան Յ. Մ. Определение периодов и форм свободных колебаний многоэтажных каркасных зданий с несущими стенами при наличии демпферных устройств. «Известия АН АрмССР (серия Г. Н.)», т. XXVIII, № 2, 1975.
2. Տապյան Ա. Օ., Տապյան Ք. Օ., Գազարյան Յ. Մ. Повышение сейсмостойкости каркасных зданий со стенами жесткости с помощью демпферных устройств. ЦНИИС Госстроя СССР, сер. «Сейсмостойкое строительство», вып. 11, М., 1975.
3. Шахназарян С. Х., Тапьян Р. О., Тапьян А. О. Возведение здания методом подъема этажей и перекрытий. М., Стройиздат, 1974.