

УДК 624.

Академик Э. Е. Хачиян, Л. А. Мовсисян

К постановке задачи о сейсмической защите сооружения путем применения активных внешних сил

(Представлено 14/X 2002)

Во время землетрясения основание сооружения вместе с фундаментом подвергаются вынужденным динамическим перемещениям. Вследствие этого в сооружение генерируются горизонтальные силы инерции, которые становятся причиной его повреждений. Возникает естественный вопрос: нельзя ли заранее установить в сооружении возбудитель колебаний, включающийся в момент начала землетрясения и вызывающий в нем горизонтальные силы противоположного инерционным сейсмическим силам направления и тем самым полностью или частично нейтрализующий сейсмическое воздействие на сооружение. Аналогичную цель преследует известная задача о гашении колебаний при землетрясении путем создания в сооружении специального колебательного устройства (гасителя колебаний), поглощающего некоторую часть энергии колеблющегося от землетрясения сооружения и обеспечивающего снижение уровня воздействия сейсмических инерционных сил на основные несущие элементы сооружения. Этот способ в теории сейсмостойкости получил название "гаситель пассивной массы". Разница между двумя постановками задачи заключается в том, что в предлагаемом варианте в сооружении необходимо возбуждать активное силовое воздействие (за счет внешнего источника энергии) на протяжении всего землетрясения, т.е. в некотором смысле в этом случае имеем дело с задачами управления нерегулярными колебаниями механических систем. Известно много вариантов эффективного практического использования метода гасителя колебания для уменьшения уровня сейсмического воздействия на жилые здания, мосты и другие сооружения, а также исследований, ставящих задачи, близкие к вышеуказанной, но с применением дополнительных установок для фильтрации акселерограммы грунта и повышения поглощающей способности сооружения. Обзор таких исследований приведен в работе [1].

Ниже рассматривается постановка задачи в указанном выше смысле в самом общем случае. Как обычно, будем считать, что расчетная схема сооружения представляет из себя консольный брус с сосредоточенными массами m_k (рис. 1). При предположении о сдвиговом характере деформирования сооружения (сосредоточенные массы совершают плоско-параллельные движения в горизонтальном направлении без поворота) дифференциальные уравнения вынужденных колебаний при движении основания по произвольному закону $y_0(t)$ и при одновременном синхронном приложении внешних активных сил $F_k(t)$ к каждой массе m_k будет иметь вид [2]

$$-m_k(y_0 - y_k)'' + a_k(y_k - y_{k-1}) + \mu_k \omega^{-1} a_k(y_k - y_{k-1})' -$$

$$-a_{k+1}(y_{k+1} - y_k) - \mu_{k+1}\omega^{-1}a_{k+1}(y_{k+1} - y_k)' + F_k(t) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где y_k - относительное перемещение (деформации) масса, a_k - жесткость k -ого этажа, μ - коэффициент вязкого сопротивления k -ого этажа, ω - круговая частота свободных колебаний сооружения.

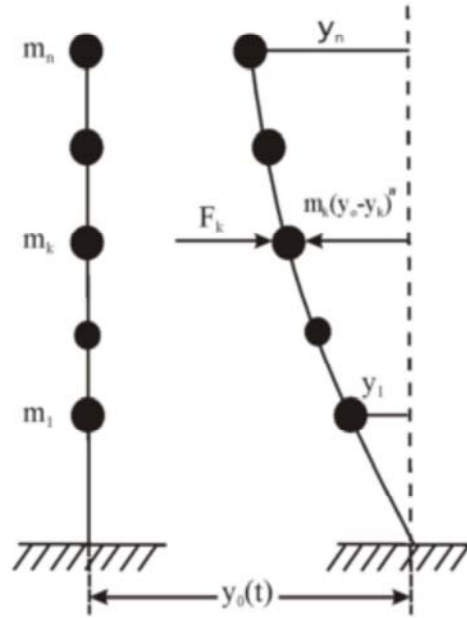


Рис. 1

В результате решения системы дифференциальных уравнений (1) методом, изложенным в [2] (при постоянстве коэффициента вязкого сопротивления $\mu_k = \text{const}$ для всех этажей), для относительных перемещений y_k получим

$$y_k(t) = \sum_{i=1}^n \eta_{ki} \frac{1}{\omega_i} \int_0^t e^{-(\mu\omega_i(t-\tau))/2} y''_0(\tau) \sin\omega_i(t-\tau) d\tau -$$

$$- \sum_{i=1}^n \eta_{ki}^* \frac{1}{\omega_i} \int_0^t e^{-(\mu\omega_i(t-\tau))/2} \left[\sum_{j=1}^n c_{ji} F_j(\tau) \right] \sin\omega_i(t-\tau) d\tau, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где c_{ji} - амплитуды j -ой массы сооружения по i -ой форме свободных колебаний, ω_i - круговая частота i -ой формы свободных колебаний, а через η_{ki} и η_{ki}^* обозначены

$$\eta_{ki} = c_{ki} \frac{\sum_{j=1}^n c_{ji} m_j}{\sum_{j=1}^n c_{ji}^2 m_j}, \quad \eta_{ki}^* = \frac{c_{ki}}{\sum_{j=1}^n c_{ji} m_j}. \quad (3)$$

Теперь задача управления в общем случае должна состоять в следующем: подобрать неизвестные активные силы $F_k(t)$ таким образом, чтобы значения перемещений $y_k(t)$ по (2) превратились в нули или оказались значительно меньше, чем без приложения активных сил $F_k(t)$, т.е. при обычном сейсмическом воздействии. Следовательно, активные силы $F_k(t)$ должны вычисляться из следующих систем n дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \eta_{ki} \frac{1}{\omega_i} \int_0^t e^{-[(\mu\omega_i(t-\tau))/2]} y''_0(\tau) \sin\omega_i(t-\tau) d\tau - \\ & - \sum_{i=1}^n \eta_{ki}^* \frac{1}{\omega_i} \int_0^t e^{-[(\mu\omega_i(t-\tau))/2]} \left[\sum_{j=1}^n c_{ji} F_j(\tau) \right] \sin\omega_i(t-\tau) d\tau = \\ & = \alpha_k \sum_{i=1}^n \eta_{ki} \frac{1}{\omega_i} \int_0^t e^{-\alpha_k[(\mu\omega_i(t-\tau))/2]} y''_0(\tau) \sin\omega_i(t-\tau) d\tau \quad k = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (4)$$

где $0 \leq \alpha_k < 1$ – отношение перемещений $y_k(t)$ с учетом активных сил к значениям тех же перемещений без их приложения (при отсутствии второго члена уравнения (2)). Или после несложных операций

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i} \int_0^t e^{-[(\mu\omega_i(t-\tau))/2]} \left[\eta_{ki}^*(\tau) \sum_{j=1}^n c_{ji} F_j(\tau) + (\alpha_k - 1) \eta_{ki} y''_0(\tau) \right] \sin\omega_i(t-\tau) d\tau = 0, \\ & k = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (5)$$

Так как из (3) следует, что

$$\eta_{ki}/\eta_{ki}^* = \sum_{j=1}^n c_{ji} m_j \quad (6)$$

условие (4) можно переписать в виде:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\eta_{ki}^*}{\omega_i} \int_0^t e^{-[(\mu\omega_i(t-\tau))/2]} \left[\sum_{j=1}^n c_{ji} F_j(\tau) + (\alpha_k - 1) y_0''(\tau) \sum_{j=1}^n c_{ji} m_j \right] \sin \omega_i(t - \tau) d\tau = 0, \quad (7)$$

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

Система уравнений (7) при $\alpha_k = \text{const}$ допускает следующее решение для неизвестных сил $F_k(t)$:

$$F_k(t) = -m_k(\alpha - 1) y_0''(t), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Как видно из (8), неизвестные силы $F_k(t)$ будут выражены через функции ускорения грунта (акселерограммы) $y_0''(t)$ с различными множителями в зависимости от величин масс m_k этажей. Это означает, что в принципе характер приложенных активных сил на всех уровнях сооружения будет одинаков и не будет отличаться от характера акселерограммы будущего землетрясения, эффект которого они призваны "смягчить" в целесообразной для безопасности сооружения степени. Это обстоятельство существенно облегчит задачу генерирования активных сил на разных уровнях сооружения, т.к. достаточно конструирования одного устройства с различными мощностями для каждого уровня, моделирующего активные силы как функции времени по акселерограмме, формулирующей на данной стройплощадке во время землетрясения. Причем следует отметить, что принципы такого устройства не будут отличаться от принципов, по которым конструируются современные мощные сейсмические платформы программного управления (по акселерограмме землетрясения). Разница будет заключаться в том, что в данном случае акселерограмма землетрясения нам заранее неизвестна. Ее необходимо получить в процессе самого землетрясения и мгновенно, с определенными масштабами (в зависимости от величины α), приложить на разных уровнях сооружения. Это означает, что информация о характере колебания грунта должна передаваться к установкам на этажах со скоростью, значительно превосходящей скорость распространения упругих поперечных колебаний в самом сооружении, чтобы обеспечить соответствующую синхронность воздействия землетрясения и активных внешних сил.

Возникает естественный вопрос: какое количество внешней энергии должно быть израсходовано для достижения нейтрализации реального сейсмического воздействия на сооружение с определенными динамическими характеристиками или его существенного "смягчения". Для этого вычислим величину кинетической энергии, накапливаемой в сооружении при его деформировании в процессе землетрясения (рис.1). Она будет выражаться формулой

$$E = \sum_{k=1}^n \frac{m_k}{2} (y'_k)^2, \quad (9)$$

где y'_k - скорость колебаний масс этажей.

Как видно из решения (2), при отсутствии активных сил и малых значений μ для y'_k будем иметь

$$y'_k \cong \sum_{i=1}^n \eta_{ki} \int_0^t e^{-[(\mu\omega_i(t-\tau))/2]} y''_0(\tau) \sin \omega_i(t-\tau) d\tau. \quad (10)$$

Второй множитель суммы (10)

$$v(T, \mu, t) = \int_0^t e^{-[(\mu\pi(t-\tau))/T]} y''_0(\tau) \sin \frac{2\pi}{T} (t-\tau) d\tau. \quad (11)$$

в теории сейсмостойкости называется спектром скоростей землетрясения [2], где $T = 2\pi/\omega$ - период свободных колебаний сооружения.

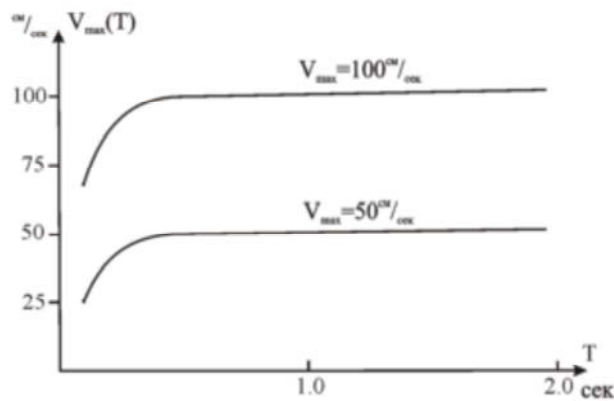


Рис. 2

На основании анализа большого числа землетрясений для спектра скоростей $v_{\max}(T)$ в настоящее время (для критического затухания $\eta = 0.02 - 0.04$; ($\mu = 0.04 - 0.08$)) принимается осредненная кривая, показанная на рис. 2. При этом кривая $v_{\max} = 50 \text{ см/с}$ соответствует умеренным землетрясениям с максимальным ускорением грунта $y''_{0\max}$ в пределах $0.1g-0.3g$, а кривая $v_{\max} = 100 \text{ см/сек}$ - сильным землетрясениям с максимальным ускорением грунта больше $0.3g$. Причем, как видно из рисунка, $v_{\max}$ почти не зависит от периода свободных колебаний сооружения T . Для малых значений (характер спектра $v_{\max}(T, \mu)$ очень нерегулярен, а при $\mu = 0$ величина $v_{\max}(T)$ может, особенно для малых T , в несколько раз превышать величины,

показанные на рисунке.

Если принимать, что упругое сооружение со многими степенями свободы обладает одинаковым коэффициентом затухания для всех форм колебаний и учитывать их ортогональность в виде [2]

$$\sum_{i=1}^n \eta_{ki} = 1, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

то максимальная энергия, накапливаемая в сооружении в среднем(9), выразится формулой

$$E = \frac{M}{2} v_{\max}^2, \quad (13)$$

где М - вся масса сооружения. Как видим, величина этой энергии зависит не от размеров и конструктивного решения сооружения, а только от полной его массы и поглощающей способности.

Тип и конструктивное решение здания	Размеры, <i>M</i>	Масса $\frac{\text{кгс} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}$	Величина энергии <i>E</i> при			
			$v_{\max} = 50 \text{ см/с}$		$v_{\max} = 100 \text{ см/с}$	
			<i>кгс-м</i>	<i>кВт</i>	<i>кгс-м</i>	<i>кВт</i>
3-этажное каменное здание	12x54x9	372000	46.5×10 ³	456	186×10 ³	1824
5-этажное каменное здание серии 1-450-2	12.7x41x14.7	2758000	34.5×10 ³	338	138×10 ³	1352
9-этажное каркасное здание с диафрагмами жесткости серии 111	18x18x27	331000	41.5×10 ³	407	166×10 ³	1628
9-этажное крупнопанельное здание серии АІ-451-КП	18x18x27	167400	21×10 ³	206	84×10 ³	824
17-этажное каркасное (металлический) здание с ж/б диафрагмами жесткости	16x16x52	336100	83×10 ³	814	332×10 ³	3258

В таблице приведены значения кинетической энергии *E*, вычисленные по формуле (13) для некоторых зданий различной этажности и конструктивного решения [3]. Фактически часть этой энергии должна компенсироваться общей работой приложенных во время землетрясения внешних активных сил.

Приведенная в таблице общая мощность внешней энергии должна обеспечиваться в течение всего землетрясения. Поэтому чем длительнее землетрясение, тем большее количество внешней энергии потребуется для "компенсации" землетрясения. Так, например, если землетрясение продолжится, скажем, десять секунд, то для "защиты" от сильного землетрясения ($v_{\max}=100$ см/с) 9-этажного каркасного здания с периодом свободных колебаний *T* верхний предел необходимой электроэнергии примерно будет

$$\frac{2ET}{\pi} \cdot \frac{10}{T} = 6.37 E = 6.37 \cdot 1628 = 10370 \text{ кВт.}$$

Стоимость этой энергии не столь велика. Но главное здесь не эта сумма, а стоимость всей сложной системы регистрации колебаний грунта во время всего землетрясения, передачи с большой скоростью этой информации в соответствующие установки на разных уровнях сооружения для синхронного возмущения соответствующих ускорений обратного направления. И еще одно важное обстоятельство - вся система должна работать в так называемом "ждущем режиме", т.е. должна быть задействована в любой момент, когда происходит сильное землетрясение. Поэтому постоянное и длительное слежение за ее бесперебойной работой до очередного землетрясения также потребует больших затрат.

Институт геологических наук НАН РА
Институт механики НАН РА

Литература

1. *Hamid Reza Mirdamadi*. Proceedings of the Third International Conference on Seismology and Earthquake Engineering. Vol. II. May 17-19. 1999. Tehran. I. R. Iran. p. 729-740.
2. *Хачиян Э. Е.* Сейсмические воздействия на высотные здания и сооружения. Ереван. Айастан. 1973. 328 с.
3. Рекомендации по определению динамических характеристик и сейсмических нагрузок для зданий по акселерограммам землетрясений. Ереван. АрмНИИСА. 1985. 110 с.

Ակադեմիկոս Է. Ե. Խաչիյան, Լ. Ա. Մովսիսյան

**Արտաքին ակտիվ ուժերի կիրառմամբ կառուցվածքների սեյսմիկ
պաշտպանվածության խնդրի դրվածքի մասին**

Երկրաշարժերի ժամանակ կառուցվածքների հիմնատակերը հիմքերի հետ ենթարկվում են ստիպողական դինամիկական տեղաշարժերի, որոնց պատճառով նրանցում առաջացած իներցիոն ուժերը պատճառ են դառնում նրանց վնասվածության: Հոդվածում խնդիր է դրվում կառուցվածքում նախօրոք ստեղծել համապատասխան տեխնիկական հարմարանքներ, որոնք երկրաշարժի ժամանակ արտաքին էներգիայի աղբյուրի հաշվին նրանցում կառաջացնեն իներցիայի ուժերին հակադարձ ուղղված ակտիվ ուժեր, որոնց շնորհիվ կառուցվածքը կմնա անվնաս:

Ստացված են այդ ուժերի մեծությունները՝ կախված երկրաշարժի ժամանակ գետնի արագացումների մեծություններից և քննարկվում են առաջարկվող եղանակի գործնական կիրառման տեխնիկական հնարավորությունները և դժվարությունները: