

УДК 624.041.2

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Э. Е. Хачиян, А. Г. Абовян

**Об одном способе экспериментального воспроизведения
сейсмического воздействия на здания и сооружения
по акселерограмме землетрясения**

(Представлено академиком АН Армянской ССР С. А. Амбарцумяном 12/XII 1984)

Сложность задачи о сейсмическом воздействии на здания и сооружения обуславливает применение различных подходов к ее разрешению. Наиболее адекватное отображение действительной картины сейсмического воздействия, по-видимому, получится при экспериментальных исследованиях. Наиболее достоверным способом экспериментального изучения сейсмического воздействия, естественно, может служить инструментальное наблюдение за поведением натурального здания или сооружения во время сильных землетрясений. С этой целью в нашей стране создана сеть инженерно-сейсмометрических станций (ИСС).

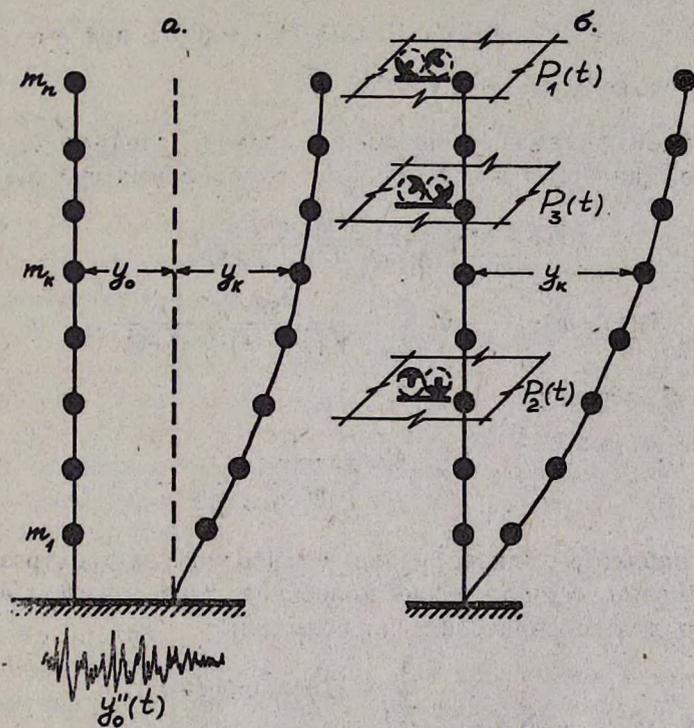
Однако проблема экспериментального изучения сейсмического воздействия при помощи ИСС имеет свои недостатки, поскольку дает возможность экспериментально изучить воздействие землетрясения только на здания тех конструктивных решений, на которых организованы ИСС. Кроме того, при помощи ИСС можно экспериментально изучать поведение зданий и сооружений только при землетрясениях, большой объем инструментальной информации о прошлых землетрясениях, накопленный в различных странах за последние 50—60 лет остается неиспользованным.

В настоящей статье сделана попытка найти способ экспериментального воспроизведения сейсмического воздействия на здания и сооружения по акселерограмме землетрясения. Очевидно, что достоверность результатов экспериментальных исследований во многом зависит от способа моделирования сейсмической нагрузки. При точном моделировании основание исследуемого сооружения необходимо вовлекать в такое сложное колебательное движение, которое имеет место при реальных землетрясениях. Применяемые в настоящее время способы такого возбуждения при помощи специально установленной на грунте вибромашины, направленного подземного взрыва или сеймоплатформы программного управления связаны с серьезными, порою непреодолимыми техническими и организационными трудностями. Кроме того, при таких возбуждениях динамическое поведение сооружения оценивается путем моделирования движения его основания. Обеспечение же прочности и надежности сооружения при землетрясениях обуславливается возникающим в нем напряженно-деформированным состоянием: его перемещение как абсолютно твердого тела, как это час-

точно имеет место при сейсмическом воздействии (через основание), на напряженно-деформированное состояние не влияет.

Следовательно, практически целесообразно при экспериментальных исследованиях моделировать непосредственно напряженно-деформированное состояние самого сооружения, которое имеет место при землетрясениях, без моделирования движения его основания (грунта). Это не только значительно повысит степень точности моделирования воздействия землетрясения (для сооружения), но и существенно облегчит его практическое осуществление.

Для выявления сущности предлагаемого способа рассмотрим следующую задачу. Допустим, что основание какого-либо здания или сооружения подвергается кинематическому возмущению по акселерограмме землетрясения (рисунок, а). Расчетную схему здания, как принято в теории сейсмостойкости, примем в виде невесомого бруса с сосредоточенными массами. Будем пока ограничиваться упругой работой конструкции и принимать, что колебания основания происходят только по направлению одной из главных осей симметрии здания.



Значения сейсмических (инерционных) сил $S_k(t)$ при этом будут⁽¹⁾:

$$S_k(t) = m_k(y_k'' + y_0'') = m_k \sum_{r=1}^n \eta_{kr} \tau(T_r, a_r, t);$$

$$\tau(T_r, a_r, t) = \frac{2\pi}{T_r} \int_0^t y_0''(\xi) e^{-\frac{a_r \pi}{T_r} (t-\xi)} \sin \frac{2\pi}{T_r} (t-\xi) d\xi, \quad (1)$$

где m_k — масса сосредоточенной нагрузки; T_r — период r -ой формы

свободных колебаний; $y_0'(t)$ —ускорение колебания основания; α_r — коэффициент затухания r -ой формы свободных колебаний; η_{kr} — коэффициент форм колебания:

$$\eta_{kr} = \frac{C_{kr} \sum_{l=1}^n m_l C_{lr}}{\sum_{l=1}^n m_l C_{lr}^2}, \quad (2)$$

где C_{kr} —амплитуда свободных колебаний.

Теперь рассмотрим следующую вспомогательную задачу. Допустим, что на уровне какого-либо ν -го этажа того же задания установлен (рисунок, б) мощный вибратор инерционного действия, при включении которого здание совершает вынужденные колебания с амплитудой A , и частотой θ . Уравнения вынужденных колебаний будут (2):

$$m_k y_k'' + a_k (y_k - y_{k-1}) + \mu_k a_k (y_k' - y_{k-1}') - \\ - a_{k+1} (y_{k+1} - y_k) - \mu_{k+1} a_{k+1} (y_{k+1}' - y_k') = P_k(t), \quad (3)$$

где $k=1, 2, \dots, \nu, \dots, n$, при $k=\nu$ $P_k(t) = A \nu \sin \theta t$; при $k \neq \nu$ $P_k(t) = 0$, $\mu_k = \frac{\alpha_r T_r}{2\pi}$, $y_{n+1} = 0$, $a_{n+1} = 0$, $y_0 = 0$.

Решением системы уравнений (3) получим следующие значения для перемещений $y_k(t)$ и сейсмических инерционных сил $S_k(t)$

$$y_k(t) = \sum_{r=1}^n \eta_{kr}^* \frac{\sin(\theta t - \lambda)}{\sqrt{(\omega_r^2 - \theta^2)^2 + \alpha_r^2 \omega_r^2 \theta^2}} \quad (4)$$

$$S_k(t) = m_k y_k'' = -m_k \sum_{r=1}^n \eta_{kr}^* \frac{\theta^2 \sin(\theta t - \lambda)}{\sqrt{(\omega_r^2 - \theta^2)^2 + \alpha_r^2 \omega_r^2 \theta^2}}, \quad (4)$$

где через η_{kr}^* обозначен

$$\eta_{kr}^* = C_{kr} \frac{C_{\nu r} A_\nu}{\sum_{l=1}^n m_l C_{lr}^2}.$$

Если вибраторы одновременно установлены на трех разных этажах и вызывают гармонические колебания типа $A_\nu \sin \theta_1 t$, $A_\nu \sin \theta_2 t$ и $A_\nu \sin \theta_3 t$, то для сейсмических сил получим:

$$S_k(t) = -m_k \sum_{r=1}^n C_{kr} \frac{\sum_{j=1}^3 A_{\nu j} C_{\nu j} r \theta_j^2 \sin(\theta_j t - \lambda_j)}{\left(\sum_{l=1}^n m_l C_{lr}^2 \right) \sqrt{(\omega_r^2 - \theta_j^2)^2 + \alpha_r^2 \omega_r^2 \theta_j^2}}. \quad (5)$$

В резонансном режиме по r -ой форме колебания, то есть при $\omega_r = \theta$, влиянием членов ряда (4), для которых $\omega_r \neq \theta$, можно пренебречь, и тогда для максимальных значений сейсмических сил по r -ой форме колебаний получим:

$$S_{kr}^{\max} = \frac{m_k}{\alpha_r} \frac{A_\nu C_{\nu r} C_{kr}}{\sum_{l=1}^n m_l C_{lr}^2}. \quad (6)$$

Следовательно, для воспроизведений землетрясения по r -ой форме колебания при помощи вибрационной машины, установленной на γ -том этаже, необходимо, чтобы имело место следующее равенство, согласно выражениям (1) и (6):

$$m_k \gamma_{kr} \tau^{\max}(T_r, \alpha_r) = \frac{m_k}{\alpha_r} \frac{A_r C_{lr} C_{kr}}{\sum_{l=1}^n m_l C_{lr}^2} \quad (7)$$

Учитывая, что при резонансе

$$A_r = m_s b_s \theta^2 = m_s b_s \left(\frac{2\pi}{T_r} \right)^2, \quad (8)$$

где m_s — масса эксцентрика; b_s — расстояние центра масс эксцентрика вибратора до оси вращения, из (7) получим:

$$m_s = \frac{\alpha_r \sum_{l=1}^n m_l \frac{C_{lr}}{C_{vr}} \left| \frac{2\pi}{T_r} \int_0^t y_0'(\xi) e^{-\frac{\alpha_r \pi}{T_r} (t-\xi)} \sin \frac{2\pi}{T_r} (t-\xi) d\xi \right|_{\max}}{\left(\frac{2\pi}{T_r} \right)^2 b_s} \quad (9)$$

Формула (9) дает возможность подобрать параметры вибромашины, то есть массу эксцентрика и расстояние b_s при известных параметрах здания T_r и α_r , и акселерограммы воспроизводимого землетрясения $y_0'(t)$, так, чтобы максимальные значения сейсмических сил по данной форме колебания по акселерограмме землетрясения и при вибрационном возбуждении совпадали.

Как показано многочисленными исследованиями, для обычных зданий и сооружений сейсмические силы S_{kr} можно определить, ограничиваясь учетом только первых трех форм колебаний. Поэтому при экспериментальном воспроизведении землетрясения также целесообразно ограничиваться первыми тремя формами колебаний, установив в здании три вибромашины, каждая из которых воспроизводит землетрясения по данной форме колебания.

Для облегчения процесса введения в резонансное состояние по данной форме колебания целесообразно вибромашины установить на уровнях тех этажей, в которых формы свободных колебаний имеют максимальные значения. Например, для 9-этажного здания с постоянной жесткостью и массой этажей такими этажами будут: для первой формы — девятый этаж; для второй — третий этаж и для третьей формы — шестой этаж. В принципе все три вибратора можно установить также на уровне одного, в частности, последнего этажа.

Так как моменты времени возникновения максимальных значений сейсмических сил S_{kr} по каждой форме колебаний как при действительном землетрясении, так и при одновременной работе трех вибраторов не совпадают, то необходимо установить степень отклонения между максимальными значениями сейсмических сил с учетом трех форм колебаний при действительном их наложении по формуле (1) и при их наложении при одновременной работе трех вибраторов с параметрами (9) по формуле (5).

С этой целью был произведен следующий численный эксперимент. По акселерограммам различных землетрясений для различных зданий (5-, 10- и 13- этажные железобетонные) на ЭВМ были определены максимальные значения сейсмических и поперечных сил по точной формуле (1) и по следующей формуле:

$$S_y(t) = m_k \sum_{r=1}^3 \eta_{kr} \tau^{\max}(T_r, a_r) \sin \frac{2\pi}{T_r} t, \quad (10)$$

которая получается из формулы (5) после подстановки в нее значения (9) и фактически равносильна установке на здании трех вибраторов, работающих в резонансном режиме по всем трем формам колебаний одновременно. Влияние сдвига фаз вибраторов λ_j , а также последовательности их включения, как показано в (4), при реальных соотношениях T_1, T_2, T_3 пренебрежимо малы, поэтому их в формуле (10) не учитываем.

В качестве сейсмического воздействия были использованы акселерограммы двух землетрясений, зарегистрированных на одной станции, и одного землетрясения, зарегистрированного на двух станциях (2,3). Из полученных результатов (таблица) видно, что напряженно-

Оношения значений поперечных сил на уровне первого этажа для различных землетрясений по формулам (1) и (10) при $\alpha_r=0,1$

Станция регистрации	Дата землетрясения	Составляющая	$u_0^*(t)_{\max}$, в долях g	Для 5-этажного здания $T_1=0,45$ $T_2=0,15$ $T_3=0,09$	Для 10-этажного здания $T_1=0,90$ $T_2=0,3$ $T_3=0,18$	Для 13-этажного здания $T_1=1,10$ $T_2=0,37$ $T_3=0,20$
Ferndale, США	7.10.1951	44 W	0,123	0,89	1,16	1,15
—	7.10.1951	46 E	0,119	0,93	1,29	1,04
—	21.12.1954	44 W	0,166	0,95	0,95	0,98
—	21.12.1954	46 E	0,209	0,83	0,98	0,95
ULCINJ—2, Югославия	15.04.1979	N—S	0,181	0,87	1,22	1,02
—	15.04.1979	N—E	0,227	0,94	0,98	0,98
HERCEC NOVI, —	15.04.1979	N—S	0,221	0,95	1,06	1,27
—	15.04.1979	N—E	0,251	0,97	1,21	1,04

деформированное состояние сооружения при реальном сейсмическом воздействии с учетом трех форм колебаний и по предложенному способу экспериментального его воспроизведения с помощью трех вибраторов достаточно близки. Отклонение в среднем составляет 10—15%.

АрмНИИСА Госстроя Армянской ССР
Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Է. Ե. ԽԱՉԻՑԱՆ, Ա. Գ. ԱՐՈՎՏԱՆ

Երկրաշարժի ակսելերոգրամի հիման վրա կառուցվածքների և շենքերի վրա սեյսմիկ ազդեցության էֆպերիմենտալ ընդօրինակման մի եղանակի մասին

Հողվածում բերվում է երկրաշարժի ակսելոգրամի հիման վրա կառուցվածքներում սեյսմիկ ազդեցության վերականգնման ընդօրինակման եղա-

նակ: Ծղանակի էությունը կայանում է նրանում, որ փորձարկվող կառուցվածքի տարրեր հարկերում տեղավորվում են երեք հզոր թրթռիչներ, որոնց տատանման բնութագրերը, ելնելով երկրաշարժի արագացումների սպեկտրից, ընտրվում են այնպես (9), որ նրանց աշխատանքի ժամանակ կառուցվածքում առաջացած իներցիոն ուժերի մեծությունները (5) լինեն հավասար այդ նույն երկրաշարժի ժամանակ առաջացած իսկական սեյսմիկ ուժերի մեծություններին (1): Մի շարք երկրաշարժերի օրինակներով 5, 10 և 13 հարկանի շենքերի համար կատարած թվային էքսպերիմենտը ցույց է տալիս, որ առաջարկված եղանակով երկրաշարժի ընդօրինակման ապահովում է բավարար ճշտության՝ 10—15% սահմաններում:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- ¹ Э. Е. Хачиян. Сейсмические воздействия на высотные здания и сооружения. Ереван. Айастан, 1973. ² Strong-Motion Earthquake accelerograms, v. 1, California. Institute of Technology, Pasadena, July, 1969. ³ Strong-Motion Earthquake accelerograms, Institute of Earthquake Engineering Seismology, Publication 67, Skopje—Yugoslavia, 1980. ⁴ С. Г. Аракелян, Изв. АН АрмССР. Сер. техн. наук, т. 29 №1 (1976)