

*Ордобаев Б.С.*

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЗДАНИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ И МЕРЫ СЕЙСМОЗАЩИТЫ

*B.S. Ordobaev*

### FEATURES OF THE BUILDINGS IN THE EFFECTS OF PULSED AND MEASURES SEISMIC

УДК: 699.841

*Приведен прочностной расчет зданий при сейсмических воздействиях и описаны особенности работы зданий при импульсных сейсмических воздействиях и сформулированы принципы и меры эффективной сейсмозащиты.*

**Ключевые слова:** сейсмический, импульсный, сдвиг, колебания, разрушения, напряжения, воздействия, сейсмозащита.

*Strength calculation shows buildings under seismic actions and describes features of the buildings at the pulse of seismic impacts and defines the principles and measures of effective seismic protection.*

**Key words:** seismic, impulse, shear, vibration, fracture, strain, impact, earthquake protection.

Как известно, за последние годы величины расчетных сейсмических ускорений были увеличены в отечественных и зарубежных нормах в среднем в 5 раз. Тем не менее, такая мера ничуть не повысила реальную сейсмостойкость зданий [1-2]. Это еще говорит о том, что нынешние сейсмические расчеты и меры сейсмозащиты абсолютно не отражают реального воздействия и что точная информация о нем пока отсутствует. Но уже теперь можно описать сущность этого воздействия, которое до сих пор не учитывалось, и на этой основе сформулировать эффективные универсальные принципы сейсмозащиты от любого сейсмического воздействия.

Самое главное, ясно, что любое сейсмическое воздействие на каждое надземное сооружение может проявиться только в динамическом смещении его опор и более ни в чем. Именно поэтому оно гораздо менее опасно, чем прямое силовое воздействие, которое не может быть ослаблено никакими специальными конструктивными мерами и потому может быть воспринято только за счет увеличения толщины и прочности конструкции.

В этом смысле сейсмическое воздействие вовсе не столь неблагоприятно. Его разрушительный эффект можно регулировать, ибо он пропорционален площади поперечного сечения стен и колонн первого этажа, связывающих здание с фундаментом. Следовательно, этот эффект можно сильно уменьшить, сведя к минимуму площадь контакта. Но при этом одновременно необходимо защитить от разрушения путем среза и раздавливания "утонченные" связующие элементы, используя для них лишь высокопрочные материалы, хорошо воспринимающие растяжение и срез. Кроме того, надо изолировать наземную часть здания от

проникновения в него сейсмической энергии и любого сейсмического движения, вызванного сейсмическим воздействием. Так как это движение может распространяться лишь волновым путем, то необходимо отсечь любые волны от здания и исключить их распространение, введя особый сейсмоизолирующий элемент. Им может быть толстая железобетонная плита, приподнятая над землей на "несрезаемых" сваях и песчаной подушке. Оси колонн, стоящих на этой толстой плите, должны быть сдвинуты относительно осей свай для того, чтобы исключить прямое сквозное распространение сейсмических волн среза или сжатия.

При этом основными расчетными параметрами в прочностных сейсмических расчетах сооружений должны стать максимальная величина ускорения или скорости грунта и время их действия.

Тот факт, что в ближайшее время будут, наконец, зафиксированы реальные величины импульсных сейсмических ускорений, не вызывает никаких сомнений. Но при этом возникает важный вопрос: что делать после того, как будут, наконец, зарегистрированы гигантские ударно-волновые ускорения грунта в тысяча и более g? Каким образом мы сможем от них защититься, если сейчас максимальное "колебательное" расчетное ускорение не превышает 0,5 g? Неужели нам придется в тысячу раз увеличивать прочность или толщину строительных конструкций? Разумеется, нет.

На самом деле, реальное ударно-волновое сейсмическое воздействие ничуть не опаснее, чем придуманное специалистами колебательное воздействие; просто оно совсем иное. Например, гигантские ускорения грунта в 1 00 000 g для нас не столь опасны в силу кратковременности их действия ( $t < 1 \cdot 10^{-4}$  с). Их разрушительный эффект резко падает при  $t < 1 \cdot 10^{-4}$  с, поскольку он пропорционален квадрату времени их действия. Он зависит от величины смещения грунта  $\Delta \Gamma$  и величины ударного импульса, приложенного к стене или колонне здания. Обе эти величины пропорциональны  $t^2 < 1 \cdot 10^{-8}$  с<sup>2</sup> и потому относительно невелики. В частности, для одного отдельного импульса смещение грунта  $\Delta \Gamma$ , вызванное ускорениями, будет равно  $\Delta \Gamma = \Delta \Gamma \cdot 0,5 = 0,5 \cdot 106 \text{ м/с}^2 \cdot 10^{-8} \text{ с}^2 = 0,005 \text{ м} = 0,5 \text{ см}$ , и не имеет ничего общего с тем, что фиксируют сейсмометры.

Чтобы наглядно показать качественные различия между вибрационными нагрузками, принятыми в

официальных сейсмических расчетах, и реальными сейсмическими ударно-волновыми нагрузками, способными произвести все реальные сдвиговые разрушения несущих элементов зданий, произведем их сопоставление по основным параметрам. При этом колебательное воздействие мы будем описывать точно так, как это делается в официальных сейсмических расчетах, т.е. будем считать его квазистатическим (приложенным очень медленно и действующим сколь угодно долго).

Для краткости мы будем называть его воздействием 1, а реальные ударно-волновое воздействие - воздействием 2.

Поскольку основными факторами, определяющими разрушение конструкций, являются величины на-жжений и время их воздействия, мы будем сопоставлять, в основном, эти параметры.

Итак, в 1-ом случае напряжения пропорциональны :сльшой массе здания и его колеблющихся элементов например, дисков перекрытий), а во 2-ом - они прямо от нее не зависят, но зависят от плотности материала.

В 1-ом случае напряжения падают с ростом площади сечения стен, стоек и колонн, а во 2-ом - они от нее либо не зависят, либо вместе с ней возрастают (особенно при росте площади стен 1-го этажа). Кроме того, они зависят от модуля сдвига материала стен и колонн.

В 1-ом случае напряжения пропорциональны малому ускорению больших колеблющихся масс здания а во 2-ом пропорциональны скорости материала во фронте волны, т.е. весьма велика и может превосходить скорость разрушения материала, а потому напряжения могут существенно превосходить статическую точность материала конструкций.

В 1-ом случае суммарная горизонтальная сила, приложенная к зданию, слабо зависит от площади сечена связей между зданиями и фундаментом, а во 2-ом - пропорциональна ей (что и определяет суть основного принципа сейсмозащиты, состоящего в предельном ее уменьшении).

В 1-ом случае несущая способность элемента оп-тетеляется предельной силой, воспринимаемой им, а ю 2-ом его предельным прочностным импульсом, или максимумом количества движения при ударе, воспринимаемого без плотного разрушения элемента.

В 1-ом случае разрешимость элемента описывается его статической прочностью  $R_t$ . Она зависит от старости нагружения и не может быть превзойдена. Во 2-ом случае напряжения могут оказаться много выше, чем  $R_t$ , и надо вводить мгновенную (теоретическую) прочность бездефектного материала  $R_m$ , превышающую  $R_t$  на 2-3 порядка. При этом скорость разрешения материала становится ключевой константой лая описания процесса ударного разрушения. Ранее в прочностных расчетах такое понятие вообще отсутствовало.

В 1-ом случае напряжения относительно невелики, но зато они действуют постоянно и должны успевать разрушить бетон путем отрыва при изгибе; во 2-ом случае они не создают изгиба, но создают срез (без изгиба). Они очень велики, но кратковременны и превышают сжимающие напряжения от вертикальных нагрузок.

В 1-ом случае резонансные горизонтальное усилие возникает при совпадении частот колебаний здания и грунта. Оно возникает как бы в самом здании, а во 2-ом - оно определяется от грунта через опоры, которые служат его проводниками, и не зависит прямо от частотных характеристик здания.

Описанные свойства ударно-волнового сейсмического воздействия определяют специфику прочностного расчета и мер защиты. На наш взгляд, в будущем использование указанных выше эффективных сейсмозащитных конструкций должно стать общеобязательным при строительстве в сейсмоактивных зонах. Оно должно начать играть гораздо более важную роль в сейсмозащите зданий, нежели их прочностные сейсмические расчеты (в отличие от того, как это принято теперь). Если заранее будет точно рассчитан сейсмоизолирующий эффект для любых стандартных наборов сейсмоизолирующих конструкций на любые ударно-волновые сейсмические воздействия, то прочностной сейсмический расчет для отдельных конкретных зданий может быть сведен к минимуму или вовсе исключен. Это будет логично, ибо точная величина расчетных ускорений грунта в каждом конкретном предстоящем сейсмическом воздействии по-прежнему останется неизвестной.

Для того, чтобы дать представление о характере прочностного расчета на действие сейсмического среза, рассмотрим вкратце, как можно произвести расчет железобетонной колонны на воздействие этого ударно-волнового среза и опишем механизм процесса ударного разрушения элемента.

Срез сильно сжатых колонн при землетрясениях могут вызвать лишь краткие квазиударные импульсы сжатия в грунте, порождающие сдвиговые ударные волны в стенах колоннах. При пробегании этих волн колонны и стены (или их непрерывно меняющиеся участки) кратковременно, на время  $t < 1 \cdot 10^{-3}$  с, принимают чисто сдвиговую форму в виде параллелограмма, бегущего по колонне или стене со скоростью звука. Затем почти мгновенно (за время  $t_s$ ) их неустойчивая сдвиговая форма сменяется стандартной изгибной формой, которая устойчива, поскольку ей отвечают минимум потенциальной энергии. Время  $t_s$  смены сдвиговой формы на изгибную для защемления по концам колонны близко к четверти периода ее колебаний по 2-ой изгибной форме с двумя полуволнами. Пока в колонне или некоторой ее переменной зоне почти мгновенно сохраняется неустойчивая сдвиговая форма, она успевает разрушиться срезом.

Для описания процесса ударно-волнового разрушения будем использовать понятие скорости разрушения  $V = f(\tau)$  полухрупкого материала (типа бетона), которое мы определяем ни как максимально возможную, а как реальную среднюю скорость роста магистральной трещины, движущейся по нормали к оси  $\sigma^+$  [3]. Предполагается, что рост магистральной трещины начинается с нуля в зоне, где за фронтом квази-ударной волны сдвига скачком появляется большое напряжение  $\tau = \sigma^+ \gg R_{\text{н}}$  и длится до расчленения ею элемента. При этом ее скорость может и не достичь максимума.

При пробегании ударно-сдвиговой волны по колонне за ее фронтом наиболее опасные микротрещины растут по нормали к оси главных растягивающих напряжений  $\sigma^+$ , т. е. примерно под углом  $\pi/4$  к оси колонны, и тем самым создают появление и рост магистральной трещины, рассекающей колонну. Разрушение колонны или любой сдвигаемой области завершается слиянием микротрещин в сквозную наклонную магистральную трещину и расчленением колонны или стены. Время разрушения  $t_b$  пропорционально толщине колонны  $h$  или минимальному размеру разрушаемой области  $\Delta = v_p t_p$ . За фронтом сдвиговой волны во всем сечении колонны скачком появляются большие сдвиговые деформации и касательные напряжения  $\tau = G V_b C^{-1}$ , и начинается процесс разрушения, т. е. роста и слияния микротрещин, идущий со средней скоростью  $V_p$ , которая может быть много ниже своего максимумам  $C$ , близкого к скорости звука.

В [3] мы предложили и обосновали экспериментально следующую формулу для скорости  $V_p$  в растянутой и сжато-растянутой, т. е. сдвигаемой зоне бетона.

$$V = C^5 R_T^{-1}; R_T = E/50$$

$$\delta = \tau = G V_b C^1, \quad (1)$$

где  $C$  - скорость звука в бетоне;  $E$  и  $G$  - соответственно модуль Юнга и сдвига;

$R_T$  - теоретическая прочность бетона;  $V_b$  и  $V_T$  - скорость материала во фронте ударной волны в бетоне и грунте.

Из (1) можно получить следующую связь между скоростями  $V_p$  и  $V_b$

$$V_p = v_b G R_T^{-1} = 20 V_b.$$

Учтя, что  $V_T \approx 10 V_b$ , получим  $V_p \approx 2 V_T$ .

Зная максимальную скорость грунта  $V_T$  и время действия импульса  $t$ , можно проверить условие ударно-сдвиговой прочности полухрупкого элемента или области с минимальным размером  $\Delta$  по формуле:

$$t \leq t_p = \Delta V_p^{-1} = \Delta / 20 V_b \text{ или}$$

$$t \leq t_p = \Delta R_T G^{-1} V_b = \Delta^1 / V_T^{-1}, \quad (2)$$

где  $t$  - время воздействия опасного ударного импульса сжатия в грунте.

Определим на основе этих формул те значения параметров сейсмической квазиударной волны в грунте, которые могут вызвать срез железобетонной колонны, типичный для землетрясений. За фронтом

ударной волны по колонне бежит область сдвига, которая стремится трансформироваться в устойчивую изгибную форму. Скорость сложного процесса трансформации и его время

$$t_1 = 0.25 T = l^2 (8 \pi h)^{-1} \cdot (12 p)^{1/2} E^{-1/2}. \quad (3)$$

Определим численные значения параметров импульсного воздействия, способного срезать реальную колонну. Задаемся следующими параметрами колонны:

$$l = 2,5 \text{ м } p = 2,5 \text{ т/м}^3; h = 0,25 \text{ М}; A = h^2; E = 3 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2;$$

$$G = 0,4 E; R_T = 0,05 G.$$

При этих параметрах, согласно (3),  $t_1 = 1 \cdot 10^{-3}$  с. Если принять, что волновые напряжения  $\tau$  возрастают не скачком (т. е. фронт волны не вертикальный), а ускорения конечны и средние растягивающие напряжения  $\sigma^+$  равны половине максимальных, то за время их действия  $t = 0,5 t_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  с колонна должна успеть разрушиться, т. е. быть срезанной. Для этого время разрушения должно быть меньше, чем время действия сдвига. Из условия  $t \leq t_p$  при  $\Delta = h$  с учетом (3) находим требуемую массовую скорость сдвига в колонне  $V_b$  и требуемую скорость разрушения

$$V_p = h t^{-1}; V_p = 0,25 \cdot 2 n 10^3 \text{ с}^{-1} = 500 \text{ м/с}; IV_6 = R_T G - IV_p$$

$$= V_p / 20 = 25 \text{ м/с}.$$

При этом средние растягивающие напряжения  $\sigma^+$  в бетоне очень кратковременно, т. е. на полмиллисекунды ( $0,5 \cdot 10^{-3}$  с), должны достигнуть огромной величины:  $\sigma^+ = \tau = G V_b C^{-1} = 750 \text{ кг/см}^2$ , что возможно лишь при очень большой скорости сдвига  $V_b$  и грунта в волне  $V_T$ . Во фронте бегущей волны средняя массовая скорость грунта  $V$  примерно на порядок больше скорости бетона, т. е.  $V \sim 10 V_b = 250 \text{ м/с}$ , тогда среднее ускорение во фронте ударной волны в грунте  $\alpha_r$  равно

$$\alpha_r = 2 V_T t^{-1} = 1 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2 = g \cdot 10^5$$

Итак, для сдвигового разрушения колонны в грунте во фронте ударной волны должны на мгновения возникнуть огромные ускорения величиной  $10^5 g$ , скорости грунта порядка  $250 \text{ м/с}$  и бетона в  $25 \text{ м/с}$ , действующие в течение половины миллисекунды ( $t = 0,5 \cdot 10^{-3}$  с) в данной точке.

Для расчета по формуле (2) надо знать среднюю скорость грунта  $V_T$  и время действия опасного импульса  $t$ . Однако сейсмометры косвенно могут дать нам лишь произведение этих величин в виде  $\delta = V t$ , где  $\delta$  - это максимальное смещение грунта при действии самого опасного импульса  $S$ . Дадим вариант расчетной формулы при сейсмическом срезе, исходя из того, что задана величина  $\delta$ . Следует подчеркнуть, что на сейсмограммах всегда вместо  $\delta$  мы видим амплитудный всплеск  $\delta_1$ , вызванный 1-ым изгибным колебанием маятника или осциллятора, после очень малого начального ударно-волнового сдвига стержня маятника или пружины прибора:  $\delta_1 = \delta K_{\text{ил}}$ .

При этом видимый на сейсмограмме всплеск  $\delta_1$  может на порядки превышать реальные смещение грунта  $\delta$ , т. е.  $\delta_1 > \delta$ . Здесь  $K$ -коэффициент,

зависящий от коэффициента затухания колебаний демпфирующей пружины; г, г<sub>1</sub>, коэффициенты ее сдвиговой и изгибной жесткости:

$$\begin{aligned} g &= G_1 l_1^{-1} h_1^2, \quad g_1 = 12 E_1 h_1^{-4} l_1^3 l_2^{-1} \\ r_1 g^{-1} &= 2,5 h_1^2 l_1^{-2} \\ \delta &= \delta_1 2,5 h_1^2 K^{-1} l_1^{-2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $G_1$ ,  $E_1$ ,  $l_1$  и  $h_1$  - модули, длина и толщина пружины сейсмометра.

Условие неразрушимости колонны при ударном сдвиге согласно [3] состоит в том, чтобы внешний импульс  $S$  не превышал предельно допустимого внутреннего импульса

$$S_p = t_p^{\min} \tau_{\max} A, \quad \text{где } t^{\min} = h(V_p^{\max})^{-1}; \quad (5)$$

$$t_p^{\min} = hc^{-1}; \quad \tau_{\max} = R_T = G/20$$

из условия  $S = S_p$  имеем

$$\begin{aligned} hAG(20C)^{-1} &= tAGV_b C^{-1} \\ V_b &= 0,1 V_T \end{aligned} \quad (6)$$

Отсюда:  $0,1 V_T = 0,1 \delta \leq h/20$ . Т.е. ключевое условие несрезаемости колонны принимает вид  $\delta \leq 0,5h$ , где  $\delta$  находится по пику сейсмограммы  $\delta_1$  согласно (4). Если базой сейсмометра служит не деформируемый осциллятор, а обычный маятник, то формула (4) принимает иной вид.

В заключение, в качестве основных выводов сформулируем еще раз более развернуто новые принципы и меры эффективной сейсмозащиты, которые мы предлагаем в качестве обязательных.

Во-первых, раз волна сдвига "забегает" в здание через опорные элементы (стены и колонны), значит площадь их поперечного сечения должна быть сведена к минимуму, необходимому для восприятия вертиальной и ветровой нагрузки. Высота этих элементов должна быть достаточна для ограничения их сдвиговых деформаций.

Во-вторых, надо обеспечить неразрушимость этих связей между зданием и его основанием, используя для них материал с высокой прочностью на растяжение и срез (типа стали) и исключить хрупкие материалы.

В-третьих, чтобы бороться с волной, проникшей в здание через связи, можно отсечь ее от здания, поставив внизу на ее пути некий массивный элемент (типа толстой плиты). Эта преграда должна отразить часть волны, а вторую часть рассеять, распределив ее на большую площадь преграды. При этом остальная верхняя часть здания будет защищена от волнового среза и будет работать лишь на вторичные колебания.

В-четвертых, необходимо обеспечить еще и наличие в здании некоей неразрушимой зоны сдвига, где будет локализовано кратковременное взаимное смещение здания и фундамента. Проще всего создать эту зону можно за счет выступающих из грунта "несрезаемых" свай, несущих толстую плиту.

В-пятых, вместо отсечения волны сдвига можно использовать несрезаемые несущие элементы (например, стальной каркас). В этом случае волна сдвига беспрепятственно "бежит" по каркасу, не вызывая его сдвигового разрушения. Но тогда придется предусмотреть специальные меры по обеспечению необрушимости перекрытий и всех второстепенных элементов здания путем соответствующего крепления их к каркасу.

Здание не должно иметь "слабых" зон и обрушаемых элементов. Оно должно воспринимать минимум сейсмической энергии за счет конструктивного решения опорной зоны, и именно это должно являться основой сейсмозащиты.

#### Литература:

1. Смирнов С.Б. Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения и сейсмозащиты сооружений // Бетон и железобетон, 1992, №11.
2. Смирнов С.Б. Причины разрушения сейсмостойких зданий и принципы их эффективной сейсмозащиты // Бетон и железобетон, 1994, №3.
3. Смирнов С.Б. О расчете защитных железобетонных оболочек АЭС на непробиваемость при ударе "мягкого" протяженного объекта // Энергетическое строительство, 1992, № 11.

Рецензент: д.т.н., профессор Тентиев Ж.Т.