

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ СООРУЖЕНИЯ ПРИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ**

*Изложены некоторые особенности ударно-волновой концепции сейсмического разрушения сооружений. Приведем шесть наиболее наглядных и часто встречающихся примеров реальных сейсмических разрушений, которые противоречат общепринятой инерционно-силовой концепции и не могут быть вызваны действием инерционных сил.*

*Ключевые слова: сейсмический, разрушения, сдвиговые волны, инерционные силы, срез, поперечный сдвиг.*

S.B. Smirnov – d. of t. s., prof. MSSU, Russian Federation,  
B.S. Ordobayev - Ph.D., prof. KRSU, Bishkek

**SOME FEATURES OF SEISMIC DESTRUCTION OF STRUCTURE IN STRONG EARTHQUAKES**

*Some peculiarities of the shock-wave concept of seismic destruction of structures are described. We will present six most obvious and frequently encountered examples of real seismic destruction that contradict the generally accepted inertial-force concept and can not be caused by inertial forces.*

*Key words: seismic, fracture, shear waves, inertial forces, shear, transverse shear.*

По многочисленным наблюдениям, большинство сейсмических разрушений зданий происходит после первых, наиболее мощных толчков, которые почти мгновенно срезают колонны и стены зданий, но не успевают раскачать здание, т. е. вызвать в нем появление опасных сил инерции.

Известно, что при землетрясениях появлению инерционных сил всегда предшествует появление волн поперечного сдвига в вертикальных элементах зданий, т. е. сдвиговые волны первичны, а инерционные силы — вторичны. Логично было бы считать именно эти волны одной из главных причин сейсмического разрушения зданий. Тем не менее, общепринятой и единственной причиной сейсмических разрушений сооружений до сих пор считают сейсмические, сугубо вторичные инерционные силы.

Такой противоречащий почти всем экспериментам подход был оправдан лишь при начале формирования сейсмической науки, но при современном развитии теории волновых процессов в грунте и теории ударной прочности материалов от него следует отказаться.

Традиционный сейсмический расчет заключается в определении эквивалентной статической величины инерционных сил, которые затем прикладываются к массивным элементам и дискам перекрытий. При этом для определения прочности и неразрушимости элементов зданий используют обычные статические прочностные константы материалов. К сожалению, данная инерционно-силовая концепция противоречит реальности. Дело в том, что всесторонний и тщательный анализ многочисленных разрушений зданий во многих случаях не согласуется с реальными схемами разрушения и даже противоречит им. Имеется много типов реальных сейсмических разрушений, которые невозможно объяснить только на базе этой концепции.

Приведем шесть наиболее наглядных и часто встречающихся примеров [1] реальных сейсмических разрушений, которые противоречат общепринятой инерционно-силовой концепции и не могут быть вызваны действием инерционных сил.

**Пример 1.** Здание с гибким каркасом и жесткими диафрагмами или ядрами жесткости.

На рис. 1 представлены очень гибкие колонны каркаса и железобетонная стена или диафрагма, горизонтальная жесткость которой на два порядка выше жесткости колонн каркаса. В связи с этим сдвигающие напряжения, возникающие в диафрагме от горизонтальной сейсмической инерционной силы  $I_c$ , приложенной к диску перекрытий, намного выше, чем в колоннах каркаса. Известно, что чем выше жесткость одного из двух параллельно работающих элементов, тем большую долю нагрузки он берет на себя. Следовательно, при достижении силой  $I_c$  некоторого опасного предельного значения первым должен обязательно разрушиться более жесткий и более напряженный элемент, т. е. диафрагма. Однако при реальных сейсмических воздействиях с преобладанием частых толчков в зданиях не происходит ничего подобного, а наблюдается противоположное: первыми разрушаются гибкие, а иногда и шарнирно опертые колонны, на которые почти не действует сила  $I_c$ , а жесткие диафрагмы и стены, воспринимающие почти всю силу, остаются невредимыми (см.рис. 1).

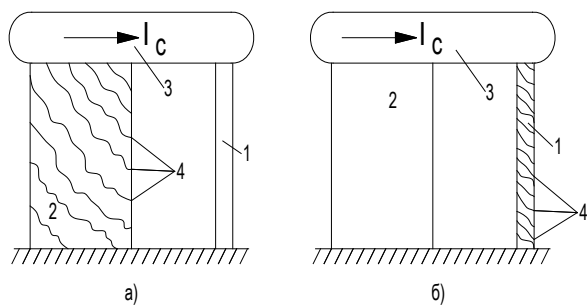


Рис. 1. Расчетная схема типового этажа здания с гибким каркасом и жесткой диафрагмой

а и б — соответственно ожидаемая и фактическая схемы разрушения; 1- колонны; 2- жесткая диафрагма; 3- диск перекрытия; 4- трещины

Согласно расчетной схеме такого здания (рис. 2) в четырех опорных сечениях  $A$  гибких колонн возникают максимальные изгибающие моменты  $M_A^{\max} = 1/4 I c h$ , которые вызваны действием инерционной силы  $I C$ , приложенной к жесткой верхней части здания. С ростом силы  $I C$  моменты  $M_A^{\max}$  достигнут предельного значения  $M_0$ , что должно привести к появлению четырех пластических шарниров по концам колонн в точке  $A$ . В результате эта рама должна превратиться в классический изгибной механизм бокового смещения. Так, на практике разрушаются все аналогичные рамы с подобной горизонтальной нагрузкой.

Однако при воздействии землетрясений с астмичными толчками такие рамы разрушаются иначе. В них возникает совершенно иной, сдвиговой механизм хрупкого разрушения, когда в наименее напряженных сечениях  $C$  (где  $M_c = 0$ ) происходит поперечный срез колонн по наклонным сечениям (см. рис. 2). Появление такого механизма при действии горизонтальной инерционной силы  $h$  представляется невероятным и противоречит основным положениям теории предельного равновесия и строительной механике. При обычных, не сейсмических горизонтальных нагрузках, никогда не возникают подобные сдвиговые механизмы со срезом колонн в наименее нагруженных сечениях  $C-C$ , а наблюдается обычный изгибной механизм.

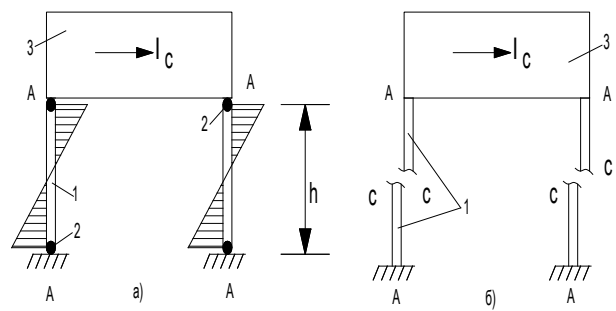


Рис. 2. Расчетная схема здания с гибким каркасным первым этажом, а и б – соответственно ожидаемая и фактическая схемы разрушения; 1 - колонны; 2 - пластические шарниры в опорных сечениях колонн; 3 - жесткий диск верхних этажей.

**Пример 3.** Стена с проемами.

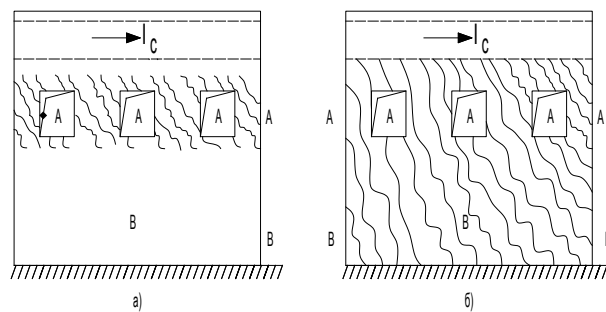


Рис. 3. Расчетная схема фрагмента здания с проемами *a* и *б* — ожидаемая и фактическая схема разрушения;

Расчетная схема дана на рис. 3

Оконные проемы ослабляют стену при ее работе на горизонтальную инерционную силу  $IC$ . Суммарное поперечное сечение всех простенков в ослабленной зоне  $A—A$  намного меньше, чем в зоне без проемов  $B—B$ , поэтому в первую очередь от предельной инерционной силы  $IC$  должны разрушаться простенки  $A—A$ , где напряжение от нее на порядок выше, чем в сплошной зоне стены  $B—B$  (см. рис. 3).

Однако на практике, согласно многочисленным натурным наблюдениям, при частых сейсмических толчках трещины появляются одновременно в ослабленной зоне  $A—A$  и сплошной  $B—B$ . Это разрушение от силы также является парадоксальным для такой схемы нагружения и противоречит положениям строительной механики.

**Пример 4.** Разрушение стен различной толщины под действием равных инерционных сил (такое решение типично для зданий АЭС и ГЭС). Оказывается, что очень часто толщина стен не влияет на разрушимость этих элементов при частых сейсмических толчках. Например, нередко инерционная сила одинаковой величины приводит к почти одновременному разрушению стен разной толщины. В то же время по инерционно-силовой концепции толщина элементов должна оказывать решающее влияние на их разрушения при сейсмических воздействиях. Отсутствие этой зависимости ставит под сомнение применение при расчетах инерционно-силовой концепции сейсмического разрушения как единственно возможной.

Далее приведем без комментариев еще два примера весьма распространенных разрушений, которые не могут быть вызваны сейсмическими инерционными силами.

**Пример 5.** Высокие диафрагмы жесткости и высокие ядра жесткости часто разрушаются в результате среза по наклонным сечениям, а не от изгиба, вызванного инерционной силой  $I_c$ , хотя нормальные растягивающие напряжения в уровне нижней заделки от действия этой силы на 1—2 порядка больше касательных.

**Пример 6.** Шарнирные колонны каркаса, где вообще не должны возникать от действия горизонтальных инерционных сил ни изгибающие моменты, ни поперечные силы, не должны разрушаться, тем не менее, разрушаются путем среза.

#### Выводы из реальных схем разрушения:

Поскольку фундаментальные теоретические положения строительной механики и теории предельного равновесия обоснованы многократными экспериментами и неопровержимы, то из анализа шести приведенных примеров следует принципиально важный общий вывод: во всех рассмотренных случаях инерционные силы не могли вызвать такие сейсмические разрушения зданий. Все они были вызваны совершенно иным по своей природе, волновым ударно-сдвиговым воздействием, приложенным к зданиям, что привело к их разрушению еще до появления инерционных сил. До сих пор это воздействие почти не принималось во внимание при прочностном расчете и не было детально исследовано.

Помимо описанных выше можно привести еще целый ряд примеров сейсмического разрушения противоречащих по своей природе инерционно-силовой концепции.

Мало того, среди множества реальных случаев сейсмического разрушения практически невозможно найти примеры, которые бы прямо свидетельствовали о том, что эти разрушения вызваны появлением опасных инерционных сил. Дело в том, что почти все реально возникавшие случаи изгибного разрушения колонн, высоких стен и ядер жесткости, похожие на разрушение от сил инерции, могут быть вызваны действием изгибных напряжений, появление которых сопровождается прохождением волн сдвиговых напряжений по вертикальным элементам зданий. Если волны сдвига имеют длину, превышающую высоту здания, указанные изгибные напряжения достигают очень больших значений и приводят к изгибному разрушению зданий, которое внешне выглядит точно так же, как и разрушение от инерционных сил. Однако такое разрушение происходит раньше появления инерционных сил.

Если учесть еще, что подавляющее большинство сейсмических разрушений происходит сразу же после первого толчка, когда здание не успевает раскачаться, а о появлении резонансных инерционных сил не может быть и речи, можно сделать общий достаточно смелый, но единственно возможный вывод о том, что подавляющее большинство сейсмических разрушений происходит не от инерционных сил, а от волнового воздействия,

которое будет описано ниже.

### Обоснование малой вероятности появления разрушающих инерционных сейсмических сил

Общепринятая концепция сейсмических разрушений зданий состоит в следующем. В грунте при землетрясениях возникает очень широкий спектр гармонических колебаний с разными частотами, но здание всегда «улавливает» в этом спектре именно свою частоту и, резонируя только с ней, разрушается, никак не реагируя на другие частоты. Однако эта концепция не имеет ничего общего с реальностью. Дело в том, что сейсмические перемещения вообще не являются колебаниями, и тем более гармоническими. При гармонических колебаниях должны были бы происходить возвратно-поступательные перемещения грунта, изменяющиеся по закону синуса или косинуса (как это происходит при колебаниях зданий). На самом же деле землетрясения создают множество хаотичных толчков, т. е. скачкообразных перемещений, которые вызваны происхождением наиболее опасных поверхностных волн сжатия в грунте. Во фронте этих волн скачком появляется скорость перемещения грунта  $V_{гр} V_{гр}$  а за волной она исчезает. Ясно, что попадание собственных колебаний здания в резонанс с хаотичными толчками весьма маловероятно. Если еще учесть, что при пластических деформациях и начальных разрушениях здание сразу «уходит» от резонанса, но при этом никак не может уйти от опасного разрушающего воздействия волн среза, то станет ясно, что вероятность разрушения от действия сейсмических инерционных сил близка к нулю.

#### Реальная причина сейсмических разрушений

Авторами работы найдено и описано то достаточно очевидное сейсмическое воздействие, которое позволяет логично объяснить все случаи реальных сейсмических разрушений, не укладывающиеся в инерционно-силовую концепцию. Причиной таких разрушений являются волны напряжений сдвига  $\tau_b \tau_b$ , которые возникают в стенах, диафрагмах и других вертикальных элементах зданий от прохождения горизонтальных сейсмических волн сжатия (или горизонтальных толчков) под зданиями.

Напряжение сдвига  $\tau_b$  определяется по следующей предлагаемой авторами формуле:  $\tau_b = G_b V_{\tau}^b (C_{\tau}^b)^{-1}, \tau_b = G_b V_{\tau}^b (C_{\tau}^b)^{-1}$ , (1)

где  $G_b$  — модуль сдвига бетона;  $V_{\tau}^b V_{\tau}^b$  — скорость горизонтальных перемещений в вертикальном бетонном элементе здания во фронте волны сдвига, поднимающейся по этому элементу,  $V_{\tau}^b = V_b V_{\tau}^b = V_b V_b$  — скорость горизонтальных перемещений во фронте сейсмической волны сжатия в железобетонном фундаменте зданий;  $C_{\tau}^b C_{\tau}^b$  — скорость распространения волны сдвига по бетонному вертикальному элементу.

Связь между скоростью горизонтальных перемещений в волне сжатия в бетоне  $V_b V_b$  с аналогичной скоростью в грунте  $V_{гр} V_{гр}$  может быть найдена из системы уравнений, описывающих условия неразрывности этих скоростей и нормальных напряжений во фронте волны на границе грунта и боковой вертикальной грани фундаментной плиты здания.

$$\sigma_{гр} + \Delta\sigma_{гр} = \sigma_b; \sigma_b = E_b V_b (C_{\tau}^b)^{-1} \sigma_{гр} + \Delta\sigma_{гр} = \sigma_b; \sigma_b = E_b V_b (C_{\tau}^b)^{-1} \\ V_{гр} - \Delta V_{гр} = V_b; \Delta\sigma_{гр} = E_{гр} \Delta V_{гр} (C_{\sigma}^{гр})^{-1} V_{гр} - \Delta V_{гр} = V_b; \Delta\sigma_{гр} = E_{гр} \Delta V_{гр} (C_{\sigma}^{гр})^{-1} \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma_{гр} \Delta\sigma_{гр}$  — разница между значениями нормальных напряжений во фронте сейсмической волны при переходе ее из грунта в бетон;  $\Delta V_{гр} \Delta V_{гр}$  — разница в скоростях перемещений во фронте волны в грунте и бетоне;  $C_{\sigma}^{гр} C_{\sigma}^{гр}$  и  $C_{\sigma}^b C_{\sigma}^b$  — скорости распространения волны сжатия соответственно в грунте и в бетоне;

$$C_{\sigma}^b = E_b^{1/2} \sigma_b^{-1/2}; C_{\sigma}^{гр} = E_{гр}^{1/2} \sigma_{гр}^{-1/2}, C_{\sigma}^b = E_b^{1/2} \sigma_b^{-1/2}; C_{\sigma}^{гр} = E_{гр}^{1/2} \sigma_{гр}^{-1/2}, \quad (3)$$

где  $E_{гр} E_{гр}$  и  $E_b E_b$  — модули сжатия соответственно грунта и бетона;  $\rho_{гр}$  и  $\rho_b$  — плотность грунта и бетона. Решив систему уравнений (2), получим следующую формулу для определения  $V_b: V_b$ :

$$V_b = 2V_{гр} [1 + (E_b \sigma_b)^{\frac{1}{2}} (E_{гр} \sigma_{гр})^{-\frac{1}{2}}], V_b = 2V_{гр} [1 + (E_b \sigma_b)^{\frac{1}{2}} (E_{гр} \sigma_{гр})^{-\frac{1}{2}}]. \quad (4)$$

Можно изолировать здание от прямого воздействия сейсмических волн Рэлея и, в особенности, от наиболее опасных поверхностных волн сжатия в грунте, если прорыть по контуру здания узкий ров на глубину заложения фундамента. Тогда на стены и другие вертикальные элементы зданий будет воздействовать значительно более слабая «вторичная» сейсмическая волна, которая передается лишь через подошву фундаментной плиты и является волной сдвига.

В этом случае существенно снижается скорость горизонтальных перемещений в бетоне фундаментной плиты  $V_b V_b$ . Ее можно найти из системы уравнений касательных напряжений и скоростей горизонтальных смещений на нижней грани фундаментной плиты, аналогичной системе (2).

$$\tau_{гр} - \Delta\tau_{гр} \tau_{гр} - \Delta\tau_{гр} = \tau_b; \tau_b = C_b V_{\tau}^b (C_{\tau}^b)^{-1} \tau_{гр}; \tau_b = C_b V_{\tau}^b (C_{\tau}^b)^{-1} \\ V_{гр} - \Delta V_{гр} = V_b \Delta\tau_{гр} V_{гр} - \Delta V_{гр} = V_b \Delta\tau_{гр} G_{гр} = \Delta V_{гр} (C_{\tau}^{гр})^{-1} G_{гр} = \Delta V_{гр} (C_{\tau}^{гр})^{-1} \quad (5)$$

где  $\Delta\tau_{гр} \Delta\tau_{гр}$  и  $\Delta V_{гр} \Delta V_{гр}$  — значения изменений напряжений и скоростей сдвига во фронте волны при ее переходе из грунта в железобетонную фундаментную плиту.

$$(V_b = 2V_{гр} [1 + (G_b \rho_b)^{\frac{1}{2}} (G_{гр} \rho_{гр})^{-\frac{1}{2}}]^{-1}, V_b = 2V_{гр} [1 + (G_b \rho_b)^{\frac{1}{2}} (G_{гр} \rho_{гр})^{-\frac{1}{2}}]^{-1}), \quad (6)$$

Предлагаемый прием сейсмоизоляции вполне пригоден и достаточно эффективен. Действительно, поскольку отношение  $\frac{G_{гр} \rho_{гр}}{G_b \rho_b}$  весьма мало, то значение  $V_b V_b$  значительно ниже, чем  $V_b V_b$  (4), а следовательно, напряжения  $\tau_b \tau_b$  (1) так же существенно снизятся при изменении скоростей.

#### Литература:

1. Железобетонные стены сейсмостойких зданий. Исследования и основы проектирования [Текст] М.: Стройиздат, 1988.-501с.