

РАСЧЁТ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗДАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИХ ПРОЧНОСТИ

Настоящая статья рассматривает вопросы расчета зданий и сооружений на сейсмическое воздействие. В статье приведены основы методики учета ударного воздействия землетрясения и расчета конструкций зданий и сооружений на это воздействие.

Ключевые слова: напряжения, сейсмические воздействия, силы землетрясения, конструкция зданий.

CALCULATION OF THE VOLTAGE OF THE SEISMIC IMPACT ON THE BUILDING AND MAINTENANCE OF THEIR STRENGTH

This article considers the questions based on the seismic impact of buildings and structures. The article describes the basics of accounting methodology of impact of the earthquake and calculation of buildings and structures to this action.

Keywords: stress, seismic effects, earthquake forces, the construction of buildings.

Сильные разрушения – это последствия не только силы землетрясения, но и неправильного проектирования, строительства, выбора материалов, средств соединения, конструктивной схемы, добросовестности строителей и т. Д. Причины разрушений (нормальные или сдвигающие напряжения) можно выявить, проанализировав деформации зданий и сооружений, устоявших во время землетрясения. Обследование таких зданий по месту появления и величине трещин, сколов и других дефектов позволяет установить физическую причину их появления.

Экспериментами установлено, что такое разрушение возможно когда ускорение более 4000 g (g – ускорение свободного падения, $4000\text{ g} = 4000 \cdot 9,81 = 39240\text{ м/с}^2$) [3]. Так как все эксперименты на сейсмоплатформах проводятся с ускорениями не более $0,5\text{ g}$, то зафиксировать сдвиговые разрушения при моделировании не удастся, т. Е. на платформах моделируется работа сооружений после шокового удара на колебательном этапе землетрясения, что не дает реальной оценки воздействия землетрясений на здания.

Таким образом, появлению инерционных сил и колебанию здания предшествует проявление сдвиговых волн в вертикальных элементах зданий (колонны, стены, простенки). В нормативных документах, регламентирующих расчеты сооружений на сейсмические воздействия, этот факт не учитывается. Официальная методика расчёта на сейсмические воздействия [1] не в полной мере отражает процессы, происходящие с материалами конструкций и в целом со зданиями и сооружениями во время землетрясения. Исходя из изложенных предпосылок разработано основы методики учёта ударного воздействия землетрясения и расчёта конструкций зданий и сооружений на это воздействие. В основе предлагаемой методики расчёта лежит общая теория удара [5, 6].

От ударного воздействия в материалах (грунт, бетон фундамента), на молекулярном уровне идет распространение волн напряжений сжатия и сдвига (σ и τ) со скоростями,

зависящими от упругих характеристик этих материалов (модуль упругости E , плотность ρ). Скорость колебания частиц во фронте этих волн обозначается V .

Причем процесс передачи волн обычно происходит в постоянной связи грунта и фундамента (до разрушения), что дает основание все вышеуказанные характеристики процесса рассматривать во взаимной связи, т. е. соблюдать условие неразрывности волн и скоростей перемещений. Кроме того, во время землетрясения идет постоянный процесс преобразования энергии удара в энергию деформации грунта и материала конструкций сооружения пропорционально их модулям упругости (деформации).

Исходя из такого представления процесса работы системы грунт–фундамент, получим взаимосвязь между скоростью колебания частиц во фронте ударной волны сжатия в грунте $V_{гр}$ и аналогичной скоростью колебания частиц во фронте волн сжатия и сдвига в бетоне фундамента V_b . Это позволит определить нормальные (сжимающие) напряжения σ_b и касательные (скалывающие) напряжения τ_b в бетоне.

Проникновение ударных волн в здание и сооружения идет двумя путями: через боковую поверхность и подошву фундамента в местах контакта с грунтом (рис.1).

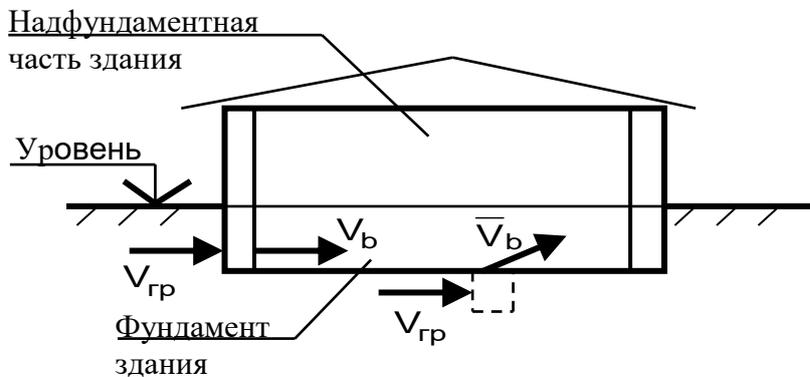


Рис. 1.Схема проникновения ударных волн в здание

В результате ударного воздействия грунта на боковую поверхность фундамента, в теле фундамента будут возникать волны нормальных напряжений σ . Запишем уравнения описывающие условия неразрывности напряжений и скоростей во фронте волны на границе грунта и боковой вертикальной грани фундамента:

$$\sigma_{гр} + \Delta\sigma_{гр} = \sigma_b, \quad (1.1)$$

$$V_{гр} + \Delta V_{гр} = V_b. \quad (1.2)$$

Уравнение пропорциональной связи относительной деформации и отношения скоростей перемещения волн и распространения удара в материале:

$$\sigma_b = \varepsilon E_b = \frac{V_b}{C_{\sigma}^b} E_b. \quad (1.3)$$

По аналогии с (3.3) запишем

$$\sigma_{гр} = \frac{V_{гр} E_{гр}}{C_{\sigma}^{гр}}, \quad (1.4)$$

$$\Delta\sigma_{гр} = \frac{\Delta V_{гр} E_{гр}}{C_{\sigma}^{гр}}. \quad (1.5)$$

Подставляем (1.5) в (1.1) и, учитывая уравнение (1.4), получим:

$$\frac{V_{гр} E_{гр}}{C_{\sigma}^{гр}} + \frac{\Delta V_{гр} E_{гр}}{C_{\sigma}^{гр}} = \sigma_b, \quad (1.6)$$

$$\text{Откуда } \Delta V_{гр} = \left(\sigma_b - V_{гр} \frac{E_{гр}}{C_{\sigma}^{гр}} \right) \frac{C_{\sigma}^{гр}}{E_{гр}}. \quad (1.7)$$

Подставляя (1.7) в уравнение (1.2) и преобразуя, получим:

$$2V_{гр} = V_{гр} \left(1 + \frac{E_b C_{гр}}{C_{\sigma}^b E_{гр}} \right), \quad (1.8)$$

$$V_{гр} = \frac{2V_{гр}}{1 + \frac{E_b C_{гр}}{C_{\sigma}^b E_{гр}}}. \quad (1.9)$$

Из теории удара известно, что скорости распространения ударной волны по материалу C_{σ}^b , C_{τ}^b и $C_{\sigma}^{гр}$, $C_{\tau}^{гр}$ зависят от их модулей деформации E и G и плотностей ρ . Так, для бетона:

$$C_{\sigma}^b = \sqrt{\frac{E_b}{\rho_b}}, \quad C_{\tau}^b = \sqrt{\frac{G_b}{\rho_b}}. \quad (1.10)$$

То же для грунта:

$$C_{\sigma}^{гр} = \sqrt{\frac{E_{гр}}{\rho_{гр}}}, \quad C_{\tau}^{гр} = \sqrt{\frac{G_{гр}}{\rho_{гр}}}. \quad (1.10a)$$

Если выразить скорость перемещения волн сжатия в бетоне и грунте через параметры материалов, то формула (1.9) запишется следующим образом:

$$V_b = \frac{2V_{гр}}{1 + \sqrt{\frac{E_b \rho_b}{E_{гр} \rho_{гр}}}}. \quad (1.11)$$

Рассмотрим второй путь поступления энергии удара – через подошву фундамента, где передача её происходит за счёт действия сдвигающих напряжений $\tau_{гр}$ на контакте грунт–подошва. Для контактных точек можно записать уравнения условия неразрывности скоростей $V_{гр}$ и сдвигающих напряжений (1.1a) и (1.2a) по аналогии с уравнениями (1.1) и (1.2), а также уравнения (1.3):

$$\tau_{гр} + \Delta \tau_{гр} = \tau_b, \quad (1.1a)$$

$$V_{гр} + \Delta V_{гр} = \bar{V}_b. \quad (1.2a)$$

При пропорциональной связи относительной деформации и отношения скоростей перемещения волн и распространения удара в материале конструкции при сдвиге:

$$\tau_{гр} = \frac{V_{гр} G_{гр}}{C_{\tau}^{гр}}, \quad (1.4a)$$

$$\Delta \tau_{гр} = \frac{\Delta V_{гр} G_{гр}}{C_{\tau}^{гр}}. \quad (1.5a)$$

Помимо этого передаваемые напряжения будут зависеть от сцепления грунта с бетоном фундамента, которое характеризуется коэффициентом сцепления C . Значения $\tau_{гр}$ и $\Delta \tau_{гр}$

необходимо скорректировать на величину отношения коэффициента C к наибольшему его значению, которое равно прочности грунта на сдвиг или прочности бетона на сдвиг, обычно принимаемое равным $(1,5 \div 2,5) R_{bt}$. В расчёте примем равным R_{bt} . Тогда по аналогии с уравнением (1.7) получим:

$$\Delta V_{гр} = \left(\tau_b - V_{гр} \frac{G_{гр}}{C_{\sigma}^{гр}} \right) \frac{C_{\sigma}^{гр} R_{bt}}{G_{гр} C}. \quad (1.12)$$

Подставив выражения (1.12) и (1.4а) в (1.2а) и решив, получим:

$$\bar{V}_b = \frac{(1 + \frac{R_{bt}}{C}) V_{гр}}{1 + \frac{R_{bt}}{C} \frac{G_b C_{гр}}{G_{\tau}^b G_{гр}}}, \quad (1.13)$$

а с учётом выражений (1.10) и (1.10а) окончательно получаем:

$$\bar{V}_b = \frac{(1 + \frac{R_{bt}}{C}) V_{гр}}{1 + \frac{R_{bt}}{C} \sqrt{\frac{G_b \rho_b}{G_{гр} \rho_{гр}}}}. \quad (1.14)$$

При передаче удара через подошву фундамента, помимо сдвигающих напряжений будут возникать и волны нормальных напряжений, которые будут складываться с нормальными напряжениями от удара по боковой поверхности.

В над фундаментном строении в уровне обреза фундамента будут возникать сдвигающие напряжения от удара по боковой поверхности фундамента, которые будут складываться со сдвигающими напряжениями, возникшими при передаче удара через подошву фундамента. Таким образом, напряжения в над фундаментном строении будут определяться от суммарной скорости V_{Σ} :

$$V_{\Sigma} = V_b + \bar{V}_b. \quad (1.15)$$

Для конструкции подземной части здания напряжения следует определять с учётом следующих зависимостей:

$$\sigma_b = \sigma(V_b) + \sigma(\bar{V}_b); \quad \tau_b = \tau(\bar{V}_b). \quad (1.16)$$

В приведенных формулах (1.1) – (1.16) использованы следующие обозначения:

$V_{гр}$, V_b , \bar{V}_b – скорости горизонтальных перемещений во фронте волны сжатия в грунте, в бетоне фундамента при передаче удара через боковую поверхность и при передаче удара через подошву соответственно;

$\Delta V_{гр}$, ΔV_b , $\Delta \bar{V}_b$ – приращение горизонтальных скоростей на контакте сред при ударе;

C_{σ}^b , C_{τ}^b , $C_{\sigma}^{гр}$ – скорости распространения волн напряжений (нормальных, сдвиговых) в грунте и бетоне в зависимости от их упругих свойств;

$\sigma_{гр}$, σ_b , τ_b – напряжения нормальные и касательные (сдвигающие) в грунте и бетоне;

$\Delta \sigma_{гр}$, $\Delta \sigma_b$, $\Delta \tau_b$ – приращения напряжений на контакте сред при ударе;

$E_{гр}$, E_b , $G_{гр}$, G_b – модули деформаций, модули сдвига грунта и бетона;

$\rho_{гр}$, ρ_b – плотности грунта и бетона соответственно.

Скорость горизонтального перемещения грунта $V_{гр}$ определяется по формуле:

$$V_{гр} = \gamma \cdot t \quad (1.17)$$

где γ – ускорение движения грунта при землетрясении; t – продолжительность импульса действия удара.

По ГОСТ 6249-52 «Шкала для определения силы землетрясения в пределах 6–9 баллов» [7] установлены численные значения ускорения земной поверхности γ в миллиметрах в секунду за секунду ($\text{мм}/\text{с}^2$) в зависимости от балльности землетрясений.

Продолжительность удара, к сожалению, не нормирована по балльности, её следует принимать путём обработки сейсмограмм землетрясений для конкретных сейсмических территорий. Для практических расчётов с обеспечением надёжности расчёта время толчка следует принимать от 0,25 до 3 секунд [2, 3, 4].

В соответствии с теорией удара по скорости горизонтальных перемещений во фронте ударной волны V можно определять уже величину нормальных и касательных напряжений в конструкциях:

$$\sigma_{\text{уд}} = V\sqrt{\rho E}, \quad (1.18)$$

$$\tau_{\text{уд}} = V\sqrt{\rho G}. \quad (1.19)$$

При определении напряжений σ и τ здание (сооружение) рассматривалось как сложная изотропная система, хотя на самом деле оно представляет собой анизотропную систему – совокупность конструктивных элементов (стены, столбы, перекрытия). При переходе от конструкции к конструкции (элемента к элементу) напряжения будут изменяться. Для того чтобы учесть это, воспользуемся условием равновесия:

$$\sigma_{\text{уд}}^{\text{пер.кон}} \sum F_{\text{пер.кон}} = \sigma_{\text{уд}}^{\text{вос.кон}} \sum F_{\text{вос.кон}}, \quad (1.20)$$

где $\sigma_{\text{уд}}^{\text{пер.кон}}$ и $\sigma_{\text{уд}}^{\text{вос.кон}}$ – напряжения на контакте передающих и воспринимающих ударное воздействие конструкций соответственно;

$\sum F_{\text{пер.кон}}$ и $\sum F_{\text{вос.кон}}$ – суммарные площади сечений, передающих и воспринимающих ударное воздействие конструкций, соответственно.

Напряжение в сечениях воспринимающих удар конструкций, исходя из этого, можно определить по формуле:

$$\sigma_{\text{уд}}^{\text{вос.кон}} = \sigma_{\text{уд}}^{\text{пер.кон}} \frac{\sum F_{\text{пер.кон}}}{\sum F_{\text{вос.кон}}} = \sigma_{\text{уд}}^{\text{пер.кон}} K_{\text{пер}}, \quad (1.21)$$

где $K_{\text{пер}}$ – коэффициент перехода, учитывающий изменение величины напряжений при переходе на границе конструкций с разными площадями.

Аналогично определяются и сдвигающие напряжения τ :

$$\tau_{\text{уд}}^{\text{вос.кон}} = \tau_{\text{уд}}^{\text{пер.кон}} \frac{\sum F_{\text{пер.кон}}}{\sum F_{\text{вос.кон}}} = \tau_{\text{уд}}^{\text{пер.кон}} K_{\text{пер}}. \quad (1.21a)$$

В силу того, что ударная волна, распространяясь по материалу конструкций здания, испытывает сопротивление, она теряет энергию и гасится, т. Е. скорость горизонтальных перемещений V снижается, а вместе с ней снижаются и напряжения. Поскольку распространение волн напряжения аналогично распространению волн звука, предположим, что угасание волн напряжения происходит так же, как и при угасании звуковой волны, т. Е. пропорционально квадрату пройденного расстояния. Рассматривая движение волны вверх по зданию и принимая, что она полностью гасится при достижении верха здания, учесть процесс потери энергии удара можно введением к величине напряжений коэффициента затухания:

$$K_3 = 1 - \left(\frac{h_i}{H}\right)^2, \quad (1.22)$$

где H – высота здания в метрах; h_i – высота, на которой определяется напряжение в метрах.

Таким образом, формулы определения напряжений от ударной волны землетрясения в вышеуказанных конструкциях запишутся в следующем виде:

$$\sigma_{уд}^{вос.кон} = \sigma_{уд}^{пер.кон} K_{пер} K_3; \quad (1.23)$$

$$\tau_{уд}^{вос.кон} = \tau_{уд}^{пер.кон} K_{пер} K_3. \quad (1.23a)$$

Заключение

Несмотря на нехватку точных значений некоторых параметров землетрясений (время толчка, скорость перемещения грунта), а также на простоту подхода к расчёту, эта методика позволяет оценить напряжённое состояние материала конструкций в различных точках зданий и сооружений.

Этот расчет предлагается производить дополнительно к расчету, предусмотренному в СНИП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» [1]. При таком подходе к расчету и проектированию сооружений их работа будет обеспечена более надежно.

Таким образом, очень важно при проектировании оценить расчетом величины напряжений в материале конструкций от действия сейсмического удара на первом этапе сейсмического воздействия и обеспечить прочность сооружения.

Литература:

1. СНИП II-1-81* Строительство в сейсмических районах. – М.: ГП ЦПП, 1996. – 52 с.
 2. Основы проектирования зданий в сейсмических районах: пособие для проектировщиков; под ред. И.Л. Корчинского. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1961.
 3. Болт Б. Землетрясения: Очерк: пер. с англ. / Б. Болт. – М.: Мир, 1981. – 256 с.
 4. Гир Дж. Зыбкая твердь: что такое землетрясение и как к нему подготовиться: пер. с англ. / Дж. Гир, Х. Шах. – М.: Мир, 1988. – 220 с.
 5. Курганов А.М. Расчет зданий на сейсмическую нагрузку методом бегущей волны / А.М. Курганов // Промышленное и гражданское строительство. – 1996. – № 6. – С. 53–55.
 6. Смирнов С.Б. Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения и сейсмозащиты сооружений / С.Б. Смирнов // Бетон и железобетон. – 1992. – № 11. – С. 28–30.
 7. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий (основы теории сейсмостойкости) учеб. Пособие для вузов – 2-е изд./С.В. Поляков. – М.: Высшая школа, 1983. – 304 с.
 8. Учет ударного эффекта при расчете зданий и сооружений на сейсмическое воздействие научное издание / П. Я. Григорьев, П. В. Муха // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: тр. 4-й междунар. Науч. Конф. Творческой молодежи. – Хабаровск, 2005. – Т. 2. – С. 210–213.
-