

Цыганенко Антонина Александровна, студент,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСЧЕТ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Аннотация: Проблема прогрессирующего обрушения зданий представляет серьёзную угрозу безопасности людей и сохранности имущества. Оно проявляется как цепная реакция разрушений, начинающаяся с локальной неисправности конструкции. Работа посвящена оценке устойчивости конструкций методом квазистатического расчёта, соответствующего своду правил СП 385.1325800.2018.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение; безопасность здания; динамические нагрузки; Pushdown и Pulldown анализы; Расчетная схема.

Проблема прогрессирующего обрушения зданий и сооружений крайне важна, поскольку она несет значительную угрозу для человеческой жизни и сохранности имущества. Даже локальные воздействия, такие как взрыв, пожар или авария, могут стать причиной масштабных разрушений. Суть проблемы заключается в том, что разрушение одного элемента может вызвать цепную реакцию, приводящую к утрате целостности всей системы.

По ГОСТ 27751-2014, п. 2.2.9 «Надежность строительных конструкций и оснований» прогрессирующее (лавинообразное) обрушение – последовательное (цепное) разрушение несущих строительных конструкций, приводящее к обрушению всего здания или сооружения или его частей вследствие начального локального разрушения. Исходя из американского стандарта ASCE 7-02 прогрессирующее обрушение (progressive collapse) – распространение начального локального повреждения в виде цепной реакции от элемента к элементу, которое, в конечном счете, приводит к обрушению всего сооружения или непропорционально большей его части.

Для анализа и предотвращения прогрессирующего обрушения строительных конструкций применяется три основных метода расчета, представленных в СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения»: квазистатический, динамический и кинематический.

Цель работы: изучить квазистатический метод для анализа прогрессирующего обрушения строительных конструкций с целью повышения их надежности и безопасности.

Расчет на устойчивость при прогрессирующем обрушении в квазистатической постановке заключается в мгновенном удалении выключаемого элемента, заменяя его на эквивалентные условия. По СП 385 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения» первичная расчетная схема – расчетная схема здания или сооружения, принятая для расчета на проектные сочетания нагрузок по первому и второму предельным состояниям. Вторичная расчетная схема – расчетная схема, полученная из первичной расчетной схемы путем исключения несущего конструктивного элемента в результате предполагаемого начального локального разрушения, при этом прочностные и деформационные характеристики материалов назначают с требованием раздела 5, а нагрузки принимают в соответствии с разделом 6 (см. рис. 1, рис. 2) [1-3].



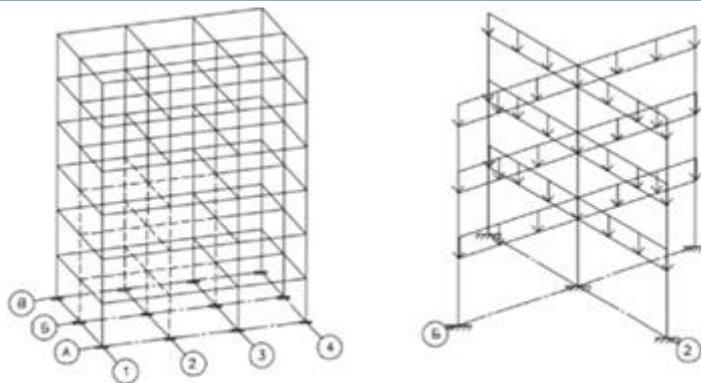


Рисунок 1. Первичная расчетная схема

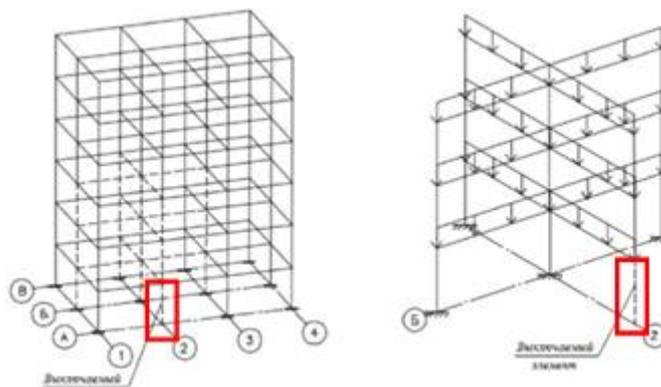


Рисунок 2. Вторичная расчетная схема

Также, чтобы предотвратить такие катастрофические последствия, инженеры применяют различные методы расчета конструкций, включая схемы нагружения pushdown и pulldown. Для квазистатических расчетов принято использовать частичный pushdown анализ, предполагающий увеличение нагрузок на горизонтальные конструкции, примыкающие к цепочке колонн над удаляемой колонной; а для нелинейных динамических расчетов – использовать частичный силовой pulldown-анализ, при котором на коэффициент динамичности умножаются действовавшие в удаляемом элементе усилия, приложенные с обратным знаком.

Для практических расчетов обычно используют полные модели (рис. 3, рис. 4)

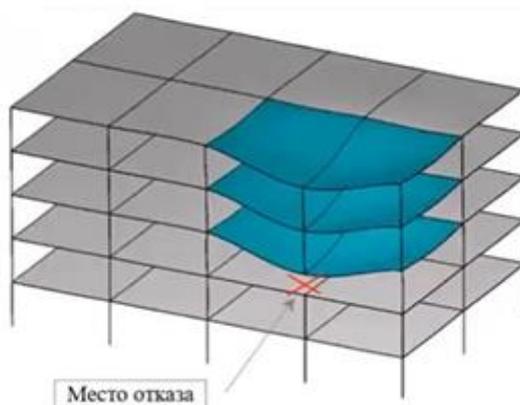


Рисунок 3. Плитная расчетная схема



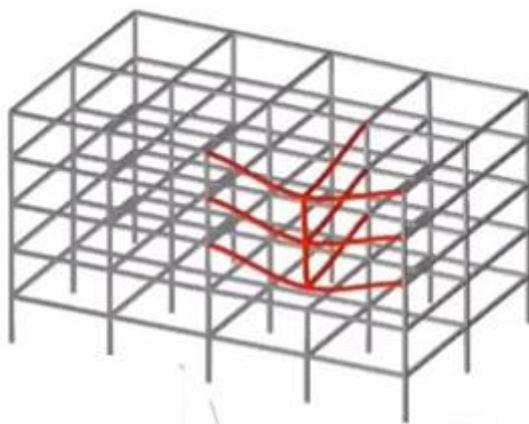


Рисунок 4. Стержневая расчетная схема

Иногда для предварительных расчетов рассматривают работу только фрагментов конструкций, сопротивляющихся прогрессирующему обрушению и активно участвующих в перераспределении нагрузок (рис. 5, рис 6).

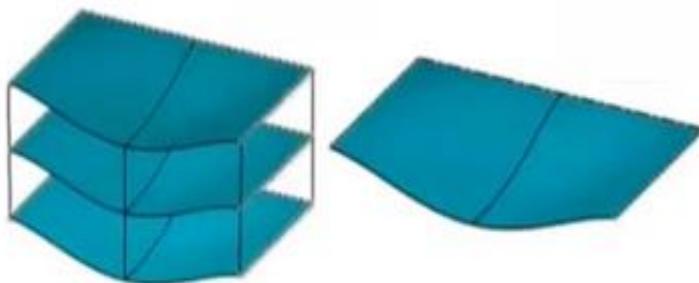


Рисунок 5. Плитный фрагмент конструкций

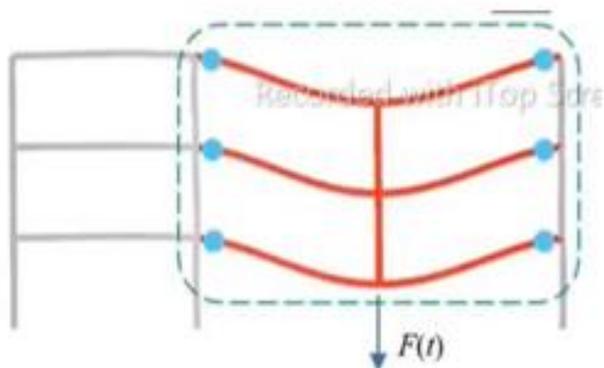


Рисунок 6. Стержневой фрагмент конструкции

В науке применяют модели (рис.7), в которой часть конструкций, сопротивляющаяся прогрессирующему обрушению, моделируется пружиной – системой с одной степенью свободы.



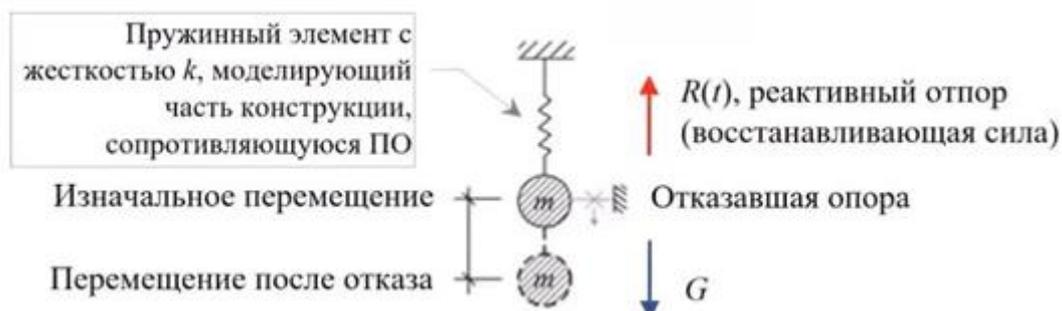


Рисунок 7. Пружина с одной степенью свободы

Поведение пружины описывается линейно или нелинейной жесткостью k . Усилия, которые возникают в этой пружине, обозначается символом R . С одной стороны, это усилие будет характеризовать интегральную резистенцию конструкции, другими словами, сопротивляемость, которая расположена над удаляемой колонной. С другой стороны, это усилие. Оно представляет собой интегральную величину воздействия этих конструкций на остальную часть здания.

Нужно отметить, что данная одномассовая система не эквивалентная сложному поведению многомассовой пространственной системе, например, целому зданию, которое реагирует на удаление части своей конструкции. Однако она позволяет заглянуть в поведение сложных систем, при этом давая некое представление о наблюдаемых в них эффектах. Например, о поведении физических, геометрических нелинейных постановках.

Вернемся к методу расчета конструктивной схемы с помощью прикладывания усилия с обратным знаком, действующее в удаленной конструкции. В рамках данного подхода это означает, что нужно задать в расчетной схеме при *pull-down* нагружении коэффициент динамичности равный двум.

Коэффициент динамичности является важной характеристикой, используемой для оценки воздействия динамических нагрузок на конструкции. Рассмотрим подробнее, откуда берется значение данного коэффициента, равное двум, в случае мгновенного приложения нагрузки.

Представим себе ситуацию, когда некий груз, висящий на нити над опорной поверхностью, и почти касается, но не опирается (высота $h=0$). В момент обрыва нити (мгновенное приложение нагрузки) на опорную поверхность будет воздействовать сила равная двум весам этого груза. Это следует из формулы (1), выведенной для коэффициента динамичности (K_d) от удара, потому что второе слагаемое под корнем обращается в ноль. Если бы груз был поднят на какую-то высоту, то коэффициент динамичности был бы уже больше двух. Зафиксируем для нашей ситуации (мгновенное удаление несущего элемента конструкции) – коэффициент динамичности может быть равен не более двух (это не касается обломков конструкций, которые могут упасть на сохранившиеся конструкции, они падают уже с какой-то высоты) [4,5].

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\sigma_c}}, \quad (1)$$

Вывод: обрушение здания – серьезная проблема, особенно когда повреждение одной части конструкции может вызвать полное разрушение. Чтобы оценить устойчивость строений к таким каркасным обрушениям, инженеры используют квазистатический метод, который позволяет учесть влияние мгновенных нагрузок и оценить устойчивость сооружения. По сути, квазистатический анализ имитирует постепенное разрушение, позволяя оценить, как здание



будет реагировать на последовательное обрушение элементов. Благодаря этому метод проектировщики могут создавать более безопасные и надежные сооружения, способные выдержать непредвиденные ситуации и минимизировать последствия возможных катастрофических процессов.

Список литературы:

1. Канаева Е.А. Живучесть зданий и сооружений при прогрессирующем разрушении // The world of science without borders: сб. тр. конф. / ТГТУ. – Тамбов, 2022. – С. 402–405.
2. Осыков С.В. Учет прогрессирующего обрушения гражданских зданий в зарубежных и отечественных нормативных документах. – 2020. – №4. – С. 72–79.
3. Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Одесский П.Д., Попов Н.А., Соловьев Д.В. Анализ нормативных требований к расчету строительных конструкций на прогрессирующее обрушение – 2019. – №2. – 15-29.
4. Г. М. Кравченко, Е.В.Труфанова. Особенности расчета сооружения на прогрессирующее обрушение. – 2019. – С. 107–108. 5. Еременко Д.В. Анализ расчетов на прогрессирующее обрушение и сейсмическое воздействие. – 2023. – С. 77-80.

