

АНАЛИЗ РИСКА ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ: ОБЗОР ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, СТРОИТЕЛЬНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ И ПРАВИЛ

RISK ANALYSIS OF PROGRESSIVE DESTRUCTION: OVERVIEW OF FOREIGN LITERATURE, BUILDING REGULATORY DOCUMENTS AND REGULATIONS

Авторы: Споров Егор Андреевич (Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет)

Аннотация: Прогрессирующее обрушение здания можно рассматривать как ситуацию, когда локальный отказ основного конструктивного элемента приводит к разрушению примыкающих элементов и к общему повреждению, которое непропорционально первоначальной причине. История показала, что здания, спроектированные в соответствии с общепринятыми проектными нормами, могут испытывать недостаток прочности, необходимой для того, чтобы противостоять локальному, частичному или даже полному обрушению. Эти переменные показатели побудили правительственные организации искать способы обеспечения минимальной степени надежности всех зданий.

Ключевые слова: локальный отказ, прогрессирующее обрушение, террористические атаки, метод альтернативного пути загрузки, метод особого локального сопротивления.

Annotation: Progressive collapse of a building can be regarded as the situation where local failure of a primary structural component leads to the collapse of adjoining members and to an overall damage which is disproportionate to the initial cause. History has demonstrated that buildings designed to conventional design codes can lack the robustness necessary to withstand localized damage, partial or even complete collapse. This variable performance has led governmental organizations to seek ways of ensuring all buildings possess a minimum level of robustness.

Keywords: Local failure, progressive collapse, terrorist attacks, alternate load path method, specific local resistance method

1. Прогрессирующее обрушение

Проблема прогрессирующего обрушения в гражданском строительстве приобрела интерес в 1968 году, после частичного обрушения жилого дома Ronan Point в Лондоне, Великобритания. После этого события исследования привели к разработке методов и стратегий для предотвращения прогрессирующего обрушения, и результатом стали первые положения по прогрессирующему обрушению в нормативных документах Великобритании. Даже современные методы в значительной степени выигрывают от подходов, разработанных в то время. Вторая и третья волна интереса со стороны инженеров появилась после

непропорционального обрушения административного здания, построенного на средства Альфреда Марра (Оклахома-Сити, 1995 г.) и полного обрушения всемирного торгового центра в Нью-Йорке, оба вызваны террористическими атаками.

Прогрессирующее обрушение может быть вызвано многими различными действиями. Примерами могут быть: взрывы, вызванные взрывом газа или взрывчатки; удары транспортных средств, кораблей или самолетов; землетрясения; человеческие ошибки на этапе проектирования или строительства и т.д. Предсказание таких событий достаточно сложно и зависит от многих факторов. С точки зрения безопасности, прогрессирующее обрушение имеет особое значение, поскольку здания и другие важные объекты инфраструктуры часто становятся объектом туристических атак. Конструкция должна быть способна вынести локальные повреждения и не допускать чрезмерного распространения их среди других конструктивных элементов. Однако проектирование большого здания против прогрессирующего обрушения из-за взрывной нагрузки является довольно сложной задачей из-за нескольких допущений и неизвестных параметров: количества и типа заряда взрывчатого вещества, расстояния от здания, где происходит взрыв, влияет ли взрыв на центральные или торцевые колонны здания и т.д.

Эти трудности приводят к тому, что в национальных строительных нормах и правилах фактически отсутствуют положения, касающиеся проектирования конструкций, способных противостоять внешним или внутренним взрывам, вызванным взрывчатыми веществами.

В этом обзоре представлено несколько определений и предположений по мерам устойчивости конструкций, а также представлен обзор методов проектирования против прогрессирующего обрушения на основе выбранных стандартов, в основном из ЕС и США. Как показано, ранее разработанные подходы к проектированию для постепенного смягчения последствий обрушения делятся на косвенные и прямые. Косвенные подходы состоят из применения предписывающих правил проектирования (минимальные требования по прочности, непрерывности элементов, пластичности, избыточности), способствующих устойчивости к прогрессирующему обрушению. Однако поведение прогрессирующего обрушения явно не рассматривается. Эти косвенные подходы к проектированию решают проблему путем выявления и включения в систему характеристик здания, которые повышают надежность без особого учета нагрузок или событий, которые могут вызвать непропорциональное обрушение. С другой стороны, прямые подходы

основаны на проектировании и состоят из метода альтернативного пути загрузки (*англ. alternate load path method*) и метода особого локального сопротивления (*англ. specific local resistance method*).

2. Обзор нормативных документов и методов расчета прогрессирующего обрушения.

2.1 Нормативные документы Великобритании (British Standards)

Великобритания была первой страной, которая ввела расчет на прогрессирующее обрушение в свои нормативные документы. Потребность в правилах по проектированию появилось после частичного обрушения Ронан-Пойнт (Ronan-Point). Общая информация о том, как проектировать здания и сооружения против прогрессирующего обрушения, указана в

BS 6399 [1]; конкретные нормы для стальных, бетонных и кирпичных конструкций даны в BS 5950 [2], BS 8110 [3] и BS 5628 [4] соответственно.

2.1.1 Комбинации нагрузок (метод альтернативного пути загрузки - alternate load path)

Для проектирования, нормативные документы Великобритании рекомендуют использовать следующую комбинацию загрузки:

$$D + \frac{W}{3} + \frac{L}{3} \quad (2.1)$$

Где:

D - постоянная нагрузка

W - ветровая нагрузка

L - приложенная нагрузка

2.1.2 Горизонтальные элементы

Стальные конструкции

·Внутренние элементы

Стальные конструкции и их узлы закрепления должны быть спроектированы способными к сопротивлению растягивающим усилиям

следующим образом:

$$T_i = 0.5(1.4g_k + 1.6q_k)s_tL, \text{ но не менее } 75 \text{ кН} \quad (2.2)$$

Где:

g_k - постоянная нагрузка на единицу площади этажа или крыши,

q_k - приложенная нагрузка на единицу площади этажа или крыши,

L - пролет,

s_t - среднее поперечное расстояние между элементами, которые проверяются.

·Крайние элементы

$$T_i = 0.25(1.4g_k + 1.6q_k)s_tL, \text{ но не менее } 75 \text{ кН} \quad (2.3)$$

Железобетонные конструкции

·Внутренние элементы

$$T_i = \frac{g_k + q_k}{7.5} \frac{l_r}{5} F_t \text{ или } 1.0F_t \quad (2.4)$$

Где:

g_k - постоянная нагрузка на единицу площади этажа или крыши,

q_k - приложенная нагрузка на единицу площади этажа или крыши,

l_r - максимальное расстояние между центрами колон, рам или стен, поддерживающих любые два смежных этажа в направлении рассматриваемого элемента,

F_t - начальная прочность, меньшее из $(20 + 4n_0)$ или 60 кН,

n_0 - число этажей

·Внешние элементы

На каждом этаже и на уровне крыши должны быть разработаны непрерывные элементы, способные противостоять растягивающему усилию равному $1.0F_t$, расположенные в пределах 1,2 м от края здания или

в пределах крайней стены.

2.1.3 Вертикальные элементы

Вертикальные элементы должны обеспечивать непрерывную связь конструкции от самого низкого до самого высокого уровня. Колонна или стена, выполненная в виде вертикального элемента, должна быть способна противостоять растягивающей силе, равной максимальной расчетной постоянной и приложенной нагрузке.

2.1.4 Метод альтернативного нагружения (*англ. alternate load path*)

Стальные конструкции

Если условия по растягивающей силе не могут быть выполнены для конструктивного элемента, то здание должно быть проверено, чтобы убедиться, что условное удаление колонны (на каждом этаже, по одной за раз) не приведет к непропорциональному обрушению.

Железобетонные конструкции

Для зданий с числом этажей 5 и выше, когда условия по растягивающей силе не может быть выполнено, конструкция должна быть проверена на удаление несущего элемента (колонну или часть стены между боковыми опорами)

2.2 Европейские кодексы (*англ. Eurocodes*)

Еврокоды (EN 1990 [5], EN 1991 [6], EN 1992 [7], EN 1993 [8], EN 1994 [9], EN 1995 [10], EN 1996 [11], EN 1997 [12], EN 1998 [13], EN 1999 [14])

это нормы по проектированию и строительству гражданских зданий и сооружений. Для случайных (особых) воздействий специально разработан EN 1991-1-7 [15], однако так как Еврокоды рассматривают в целом, есть много ссылок на другие части в частности EN 1990 [5] и EN 1991 [6].

EN 1991-1-7 [28] дает правила для проектирования зданий против идентифицируемых и неидентифицируемых случайных (особых) воздействий.

Однако, как написано в Еврокоде, EN 1991-1-7 конкретно не касается

случайных воздействий, вызванных внешними взрывами, войнами и террористической деятельностью, остаточной устойчивостью здания или других строительных работ, поврежденных в результате сейсмического воздействия или пожара и т. д." (EN 1991-1-7 [15], 1.1(6)). Таким образом, при проектировании конструкции против возможной угрозы террористического нападения проектирование должно проводиться в соответствии с положениями о непредусмотренном случайном воздействии.

2.2.1 Комбинации загрузки

Случайные воздействия должны применяться одновременно в сочетании с постоянными и приложенными нагрузками в соответствии с (EN 1990 [26], 6.4.3.3).

Комбинация воздействий для случайных проектных ситуаций в максимальных предельных состояниях согласно (EN 1990 [26], 6.4.3.3) выглядит следующим образом:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ или } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,1} Q_{k,i} \quad (2.5)$$

Где:

G – постоянная нагрузка,

P – значение предварительного напряжения,

A_d – случайное (особое) воздействие,

Q – приложенная нагрузка (воздействие от людей, снега, ветра),

$\psi_{1,1}$ – коэффициент для переменного значения приложенной нагрузки,

$\psi_{2,1}$ – коэффициент для квазипостоянного значения приложенной нагрузки.

Случайное воздействие A_d следует принимать как явное воздействие A_d для огня или удара, или может относиться к ситуации после случайного воздействия. В этом случае A_d равно нулю.

В параграфе EN 1990 [5], 4.1.2(8) гласит: "Для случайных воздействий

проектное значение A_d должно быть указано для отдельных проектов на основе EN 1991 [6]”.

2.2.2 Горизонтальные элементы

Для каркасных конструкций непрерывные внутренние конструктивные элементы и их узлы закрепления должны выдерживать расчетное растягивающее усилие равное:

$$T_i = 0.8(g_k + \psi q_k)sL, \text{ но не менее } 75 \text{ кН} \quad (2.6)$$

Аналогично для торцевых конструктивных элементов расчетное растягивающее усилие равно:

$$T_i = 0.4(g_k + \psi q_k)sL, \text{ но не менее } 75 \text{ кН} \quad (2.7)$$

Где:

s - площадь элемента,

L - пролет,

ψ - коэффициент для комбинации эффектов воздействия для случайной проектной ситуации (как в формуле 3.5),

Так же расчетные растягивающие усилия в конструктивных элементах следует рассчитывать следующим образом:

·Для внутренних элементов

$$T_i = \frac{F_t(g_k + \psi q_k)z}{7,5} \frac{z}{5} F_t \text{ или } T_i = F_t \text{ большее значение} \quad (2.8)$$

·Для торцевых элементов

$$T_p = F_t \text{ большее значение} \quad (2.9)$$

Где:

F_t - 60 кН/м или $20+4n_s$ [кН/м], меньшее из двух

n_s - число этажей,

z - меньшее значение, $5 \cdot H$ или наибольшее расстояние в направлении элемента между центрами колонн или другими вертикальными несущими

элементами, независимо от того, перекрыто расстояние одной плитой или системой балок и плит,

H – высота этажа.

2.2.3 Вертикальные элементы

Все вертикальные конструктивные элементы (для каркасных и стеновых конструктивных систем) должны быть непрерывными от фундамента до уровня крыши.

Для каркасных конструкций вертикальные элементы должны быть способны воспринять случайное расчетное растягивающее усилие, равное наибольшей вертикальной постоянной нагрузке и сосредоточенной нагрузке, приложенной к колонне с любого одного этажа. Следует отметить, что эта случайная расчётная нагрузка не должна действовать одновременно с постоянными и временными нагрузками, которые могут действовать на конструкцию.

Для стеновых конструктивных систем, вертикальные конструктивные элементы могут считаться эффективными если:

a) Толщина кладочных стен должна составлять не меньше 150 мм, и они должны иметь минимальную прочность на сжатие 5 Н/мм² (смотреть EN 1996 [11]),

b) Высота стены, измеренная в метрах между уровнями пола или крыши не должна превышать 20t, где t – толщина стены в метрах.

c) Если вертикальные конструктивные элементы могут воспринять следующую силу:

$$T = \frac{34A}{8000} \left(\frac{H}{t}\right)^2 \text{ или } 100 \text{ кН/м } \text{ большее значение} \quad (2.10)$$

Где A – площадь поперечного сечения стены в мм², измеренная в плане, исключая не несущую полость в стене.

2.2.4 Ключевые элементы

Для строительных конструкций ключевой элемент должен противостоять случайному расчетному воздействию A_d примененному в

горизонтальном и вертикальном направлениях (по одному направлению за раз). Такая случайная расчетная нагрузка должна применяться в соответствии с

(6.11b EN 1990 [5], смотреть здесь формулу (3.5)), и может быть сосредоточенной или распределенной. Рекомендуемое значение $A_d = 34 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$.

2.2.5 Комбинации загрузки

ASCE 7 [16] дает следующие сочетания нагрузок:

·Для метода особого локального сопротивления (*англ. specific local resistance method*):

$$1.2D + A_k + (0.5L \text{ или } 0,2S) \quad \text{или} \quad (2.11)$$

$$(0.9 \text{ или } 1,2)D + A_k + 0.2W_n \quad \text{или} \quad (2.12)$$

·Для метода метод альтернативного нагружения (*англ. alternate load path*)

$$(0.9 \text{ или } 1,2)D + (0.5L \text{ или } 0.2S) + 0.2W_n \quad (2.13)$$

Где:

D - постоянная нагрузка,

L - нагрузка от людей,

W_n - ветровая нагрузка,

S - снеговая нагрузка,

A_k - эффект нагрузки в результате чрезвычайного события, которое должно быть определено компетентным органом.

Список литературы:

1. BS 6399. BS 6399: Loading for buildings: Part 1: Code of practice for dead

and imposed loads. British Standards Institute, 1996.

2. BS 5950. BS 5950: Structural use of steelwork in building: Part 1: Code

of

practice for design - Rolled and welded sections. British Standards Institute,

2000.

3. BS 8110. BS 8110: Structural use of concrete: Part 1: Code of practice for

design and construction. British Standards Institute, 2000.

4. BS 5628. BS 5628: Code of practice for use of masonry: Part 1: Structural use

of unreinforced masonry. British Standards Institute, 1978.

5. EN 1990. Eurocode 0 - EN 1990: Basis of structural design, 2002.

6. EN 1991. Eurocode 1 - EN 1991: Actions on structures, 2004.

7. EN 1992. Eurocode 2 - EN 1992: Design of concrete structures, 2004.

8. EN 1993. Eurocode 3 - EN 1993: Design of steel structures, 2004.

9. EN 1994. Eurocode 4 - EN 1994: Design of composite steel and concrete

structures, 2002.

10. EN 1995. Eurocode 5 - EN 1995: Design of timber structures, 2002.

11. EN 1996. Eurocode 6 - EN 1996: Design of masonry structures, 2002.

12. EN 1997. Eurocode 7 - EN 1997: Geotechnical design, 2002.

13. EN 1998. Eurocode 8 - EN 1998: Design of structures for earthquake resistance, 2002.

14. EN 1999. Eurocode 9 - EN 1999: Geotechnical design, 2002.

15. EN 1991-1-7. Eurocode 1 - EN 1991-1-7: Actions on structures - Part 1-7:

General actions - Accidental actions, 2006.

16. ASCE 7. ASCE 7: Minimum design loads for buildings and other structures.

American Society of Civil Engineers, 2005.

17. NIST Best Practices. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive

Collapse in Buildings. U.S. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D.C., 2007.

18. GSA Guidelines. GSA Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines

for New Federal Office Buildings and Major Modernizations Projects. General Services Administration (GSA), 2003.

19. Progressive collapse risk analysis: literature survey, relevant construction standards and guidelines. KOKOT Seweryn, SOLOMOS George, 2012.