

Анализ исследований прогрессирующего обрушения высотных зданий

Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, Д.С. Костенко

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: В работе рассмотрена проблема оценки устойчивости высотных зданий к прогрессирующему обрушению. Выполнен анализ существующих методик по расчету каркаса здания на прогрессирующее обрушение. Даны рекомендации по повышению несущей способности железобетонных элементов каркаса при аварийных воздействиях. Предложено имитационное моделирование аварийного воздействия с использованием метода конечных элементов при расчете каркаса здания на прогрессирующее обрушение; моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния отдельных элементов каркаса здания на действие взрывной нагрузки; моделирование и исследование устойчивости к прогрессирующему обрушению каркаса высотного здания; разработка конструктивных решений по повышению устойчивости к прогрессирующему обрушению.
Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, аварийное воздействие, метод конечных элементов, моделирование каркаса здания, напряженно-деформированное состояние.

Проблема оценки несущих конструкций здания при аварийных воздействиях чрезвычайно актуальна в связи с участвовавшими случаями взрывов бытового газа, наезда транспортных средств на конструкции зданий и сооружений, техногенных катастроф, террористических актов. В настоящее время при расчете каркаса здания на прогрессирующее обрушение применяется методика удаления наиболее нагруженной колонны первого этажа. Однако, существующие методики по расчету зданий на прогрессирующее обрушение вызывают множество споров.

Согласно статье 7 (Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений») строительные конструкции зданий и сооружений должны обладать такой прочностью и устойчивостью, чтобы при разрушении отдельных несущих конструкций или их частей не возникало угрозы причинения вреда здоровью людей; согласно статье 16, п. 6 при проектировании здания или сооружения повышенного уровня ответственности должна быть учтена ситуация, являющаяся важной с точки зрения последствий достижения предельных

состояний, которые могут возникнуть при этой ситуации, в том числе возникшей в связи со взрывом, столкновением с транспортным средством, пожаром, а также непосредственно после отказа одной из несущих строительных конструкций.

Одним из способов повышения устойчивости зданий к прогрессирующему обрушению является обеспечение взаимосвязи элементов каркаса здания. Известен патент на связевой каркас здания [1], который содержит балки (ригели) в одном направлении, распорки – в другом, и связи. Распорки выполняют решетчатыми с параллельными поясами и крепят к колоннам по поясам шарнирно. Между распорками устанавливают решетчатые стойки с параллельными поясами с зазором от колонн и крепят к ним в нескольких узлах по высоте этажей и к распоркам по поясам шарнирно, а связевые раскосы между распорками и стойками крепят к распоркам в любом узле, кроме соседнего с колонной. Недостатками данной конструкции является малая горизонтальная жесткость, трудоемкость в изготовлении, транспортировке и монтаже, высокий расход металла.

Обеспечение взаимосвязи элементов каркаса здания возможно путем устройства аутригерных этажей. Известна конструкция аутригера с прямоугольными вырезами по периметру этажа [2], однако, существенные зоны концентрации напряжений приводят к появлению вертикальных трещин при эксплуатации сооружения.

В.И. Травуш [3] описывает конструкцию аутригерного этажа, который представляет собой сочетание опоясывающей фермы, располагаемой по наружным колоннам, и вертикальных связей, соединяющих ферму с центральным ядром. В статье также упоминаются варианты двухэтажных аутригерных этажей и аутригеров без опоясывающих ферм и вертикальных связей.

В работе Алмазова В.О. [4] рассматриваются меры по противодействию прогрессирующему разрушению. В частности, выполнен анализ напряженно-деформированного состояния каркаса многоэтажного здания при удалении угловой, крайней и промежуточной колонны. Исследования многоэтажного рамного каркаса показали, что при этажности более 10-11 этажей существенно меняется величина нагрузки, приходящаяся на ригель над удаляемой колонной. При этом наблюдалось, что все ригели работают приблизительно одинаково. При исследовании высотного здания после удаления средней колонны в конечно-элементной модели, момент в ригеле над удаленной колонной увеличивается в 3,75 раза по сравнению с моментом в ригеле одноэтажной рамы. При этом, момент в ригеле над колонной, смежной с удаленной, увеличивается в 2,9 раза. В качестве решения проблемы прогрессирующего обрушения строительных объектов используются связевые этажи, работающие по «мостовой схеме». При выполнении каждого 5-го этажа как связевого, после удаления средней колонны модели момент в ригеле над удаленной колонной увеличивается в 1,34 раза по сравнению с ригелем одноэтажной рамы. Момент в ригеле над смежной с удаляемой колонной увеличивается в 1,65 раза. Устройство аутригерных этажей является эффективным методом обеспечения сопротивления прогрессирующему обрушению. Примером применения аутригерных этажей являются здания московского «Сити», в которых 5-10 этажные рамные блоки располагаются над связевым этажом.

Алмазов В.О., Плотников А.И. и Расторгуев Б.С. [5] предлагают три варианта требований и, соответственно, три варианта решения проблемы прогрессирующего разрушения:

- после аварийного воздействия здание или сооружение получает повреждения только в пределах зоны его действия;

- после аварийного воздействия здание (сооружение) становится непригодным для дальнейшей эксплуатации, но сохраняет несущую способность;

- после аварийного воздействия здание (сооружение) становится непригодным для дальнейшей эксплуатации и сохраняет свою форму в такой степени, что находящиеся в нем люди могут безопасно эвакуироваться. Для предотвращения распространения локального разрушения и превращения его в глобальное, авторы, как один из методов, предлагают «расчетно-конструктивные «ответы» на возможные повреждения».

Особый интерес представляют исследования по повышению устойчивости несущих конструкций зданий и сооружений от действия взрывных нагрузок. Выполнены многочисленные натурные эксперименты на образцах и крупноразмерных фрагментах каркаса. В работе Crawford J.E., Malvar L.J. [6] предлагается расчетный аппарат для определения прочности железобетонных колонн на срез и изгиб при восприятии взрывных нагрузок. Компьютерные расчеты подтверждены результатами сравнений испытаний на натурном фрагменте четырехэтажного здания с обычным и усиленным внешним армированием.

Исследование влияния внешнего армирования на восприятие взрывной волны горизонтальными железобетонными плитами проведено в университете Миссури (США). Результаты проведенного эксперимента показали, что наклейка усиливающего композиционного материала на обе поверхности плиты значительно повышает устойчивость к восприятию взрывной нагрузки. Однако, композитные материалы, используемые для усиления строительных конструкций, требуют тепловой защиты, препятствующей потере функциональных свойств. Концепция тепловой защиты конструкций, усиленных углепластиком, должна учитывать особенности поведения в температурном поле как композитного материала,

так и эпоксидной матрицы, применяемой для приклейки ткани к поверхности конструкции.

Полимерные затвердевшие клеевые составы начинают терять свои свойства при температуре 65 – 150°C. Поэтому при использовании композитных материалов необходимо предусматривать мероприятия по огнезащите. Одно из мероприятий – устройство огнезащитного покрытия по поверхности усиливаемых конструкций. Для уточнения требований к такому покрытию в США были проведены испытания железобетонных колонн круглого сечения, усиленных одним слоем однонаправленной углеродной ткани, наклеенной на поверхность колонн с помощью эпоксидного адгезива. Одними из критериев взрывоустойчивости являлись возможность отказа системы усиления вследствие потери сцепления углепластиковой накладки с поверхностью колонн при деградации адгезива, а также сгорания композита. Проведенные испытания подтвердили возможность применения композитных материалов для железобетонных конструкций при действии высоких температур при соответствующей огнезащите.

В работе Кузьменко В.А. [7] содержатся данные об экспериментальных и теоретических исследованиях задач ударного взаимодействия. Проводились натурные эксперименты с телами цилиндрической формы. Варьировался диаметр используемых тел, скорость взаимодействия с преградами и угол встречи от нормали к поверхности преграды. Исследовались бетонные и железобетонные плиты толщиной от 24 до 400 мм, зависимость армирования на характер разрушений.

В работе Хорошиловой А.Н. [8] исследованы взрывные воздействия на основные модели хрупких материалов. Разрушение рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов под действием образующихся в процессе напряжений.

Анализ опубликованных работ показывает, что методики расчета высотных зданий на прогрессирующее обрушение несовершенны.

Предлагается имитационное моделирование аварийного воздействия с использованием метода конечных элементов при расчете каркаса здания на прогрессирующее обрушение; моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния отдельных элементов каркаса здания на действие взрывной нагрузки; моделирование и исследование устойчивости к прогрессирующему обрушению каркаса высотного здания; разработка конструктивных решений по повышению устойчивости к прогрессирующему обрушению.

Учет локальных разрушений в аварийных ситуациях каркаса высотного здания возможен в виде расчета отдельных несущих элементов на взрывные воздействия в нелинейно-динамической постановке.

Анализ результатов численных экспериментов по определению несущей способности элементов каркаса здания при взрывном воздействии показал, что наиболее эффективными мероприятиями являются увеличение процента армирования колонн и применение стальной обоймы. Однако, при одинаковом расходе стали усиление колонны стальной обоймой дает больший эффект, чем при повышении коэффициента армирования. В случае усиления колонны листовым прокатом коэффициент снижения несущей способности составляет 6-14%; при повышении процента армирования при таком же расходе стали, коэффициент снижения несущей способности составляет 11-19%.

Литература

1. Патент на полезную модель «Связевой каркас здания» RU № 2418916, E04B1/00, опубл. 20.05.2011 г.

2. Чернуха Н.А. Оптимальное положение и конструкция аутригерных систем в высотных зданиях. *Construction of Unique Buildings and Structures*. – 2015. – №9 (36). – С. 19 – 27.

3. Травуш В.И. Аутригерные конструкции высотных зданий со стальным каркасом. *Высотные здания*, Выпуск 2, 2014. – С. 32 – 35.

4. Алмазов В. О. Проблемы прогрессирующего разрушения строительных объектов. *Строительство. Деловая слава России*, — URL: d-s-r.ru/texts/74-77.pdf.

5. Алмазов В.О. Плотников А.И. Расторгуев Б.С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению. *Вестник МГСУ*, №2, 2011. – С. 115 – 121.

6. Crawford, J.E., Malvar, L.J., Morrill, K.B., & Ferritto, J.M. Composite retrofits to increase the blast resistance of reinforced concrete buildings. In *Symposium on interaction of the effects of munitions with structures*, San Diego, CA, 2001. – pp. 3 – 5.

7. Кузьменко В.А. Новые схемы деформирования твердых тел. — Киев: Наукова думка, 1973. — 200 с.

8. Хорошилова А.Н. Прочность железобетонных колонн при взрывных и неоднократных ударных нагрузках: дис. канд. техн. наук. Томск, 2008. – С. 58 – 61.

9. Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, С.Г. Цуриков, В.И. Лукьянов. Расчет железобетонного каркаса здания с учетом аварийного воздействия во временной области. *Инженерный вестник Дона*, 2015, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2886.

10. Д.Р. Маилян, П.П. Польской, С.В. Георгиев. Свойства материалов, используемых при исследовании работы усиленных железобетонных конструкций. *Инженерный вестник Дона*, 2013, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1673.



11. M.M. Gram, A.J. Clark, G.A. Hegemier, F. Seible, Laboratory simulation of blast loading on building and bridge structures, Structures Under Shock and Impact IX, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 87, 2006, pp.33-44.

References

1. Patent «Svyazevoj karkas zdaniya» RU № 2418916, E04B1/00, opubl. 20.05.2011 [Patent for the utility model «Bond frame of the building»].
 2. Chernuha N.A. Construction of Unique Buildings and Structures. 2015, №9 (36). pp. 19 – 27
 3. Travush V.I. Autrigernye konstrukcii vysotnyh zdaniy so stal'nyim karkasom Vysotnye zdaniya, Vypusk 2, 2014. pp. 32 – 35.
 4. Almazov V. O. Problemy progressiruyushchego razrusheniya stroitel'nykh ob"ektov. Stroitel'stvo. Delovaya slava Rossii, Rezhim dostupa: d-s-r.ru/texts/74–77.pdf.
 5. Almazov V.O., Plotnikov A.I. Rastorguev B.S. Vestnik MGSU, №2, 2011. pp. 115 – 121.
 6. Crawford, J.E., Malvar, L.J., Morrill, K.B., & Ferritto, J.M. Composite retrofits to increase the blast resistance of reinforced concrete buildings. In Symposium on interaction of the effects of munitions with structures, San Diego, CA, 2001. pp. 3 – 5.
 7. Kuz'menko V.A. Novye skhemy deformirovaniya tverdyh tel. [New schemes of deformation of solids]. Kiev: Naukova dumka, 1973. p. 200.
 8. Horoshilova A.N. Prochnost' zhelezobetonnykh kolonn pri vzryvnykh i neodnokratnykh udarnykh nagruzkah [Strength of reinforced concrete columns with explosive and repeated impact loads]: dis. kand. tekhn. nauk. Tomsk, 2008. pp. 58 – 61.
 9. G.M. Kravchenko, E.V. Trufanova, S.G. Curikov, V.I. Luk'janov Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2886.
-



10. D.R. Mailjan, P.P. Pol'skoj, S.V. Georgiev. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1673
11. M.M. Gram, A.J. Clark, G.A. Hegemier, F. Seible, Laboratory simulation of blast loading on building and bridge structures, Structures Under Shock and Impact IX, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 87, 2006, pp.33-44.