

ОСОБОЕ ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

PARTICULAR LIMIT STATE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES UNDER EMER- GENCY EXPOSURE

Э. Н. КОДЫШ, д-р техн. наук, проф.

Н. Н. ТРЕКИН, д-р техн. наук, проф.

Анализируется возможность установления особого предельного состояния для изгибаемых железобетонных конструкций, при котором в результате взрыва, техногенной аварии или иных запроектных воздействий конструкция выведена из функционального состояния и находится в стадии разрушения, но не превратилась в свободно деформируемый механизм, вызывающий обрушение конструкции.

Проведенные численные эксперименты показали, что значительный рост деформаций в изгибаемых элементах происходит за счет как пластических свойств растянутой арматуры, так и неупругих деформаций сжатого бетона.

Введение в практику проектирования особого предельного состояния может значительно изменить оценку поведения зданий и сооружений при чрезвычайных ситуациях, вызванных аварийными кратковременными воздействиями, и позволит корректно учесть перераспределение усилий в несущей системе при отказе одного или нескольких несущих элементов, а дифференцированные требования к «живучести» различных зон здания (пути эвакуации и остальные помещения) не мешают эвакуации людей и позволят уменьшить расходы на строительство.

The article examines the possibility of establishing a specific limit state for bending of reinforced concrete structures wherein, in the explosion, technological accidents or other beyond-design impacts, the design derived from the functional state and is under destruction but did not become a freely deformable mechanism causing collapse of the structure.

Numerical experiments showed that a significant increase of strains in bent elements is caused by the plastic properties tensile reinforcement, and through inelastic deformation of the compressed concrete.

The introduction of a particular limit state in the design practice can substantially change the assessment of the behavior of buildings and constructions under emergencies caused by accidental short-term impacts and will enable to properly take into account the redistribution of effort in the bearing system when the failure of one or more bearing elements, and differentiated requirements for 'survivability' of various areas of the building (the evacuation routes and the rest of the room) will not prevent the evacuation of people and will reduce construction costs.

Ключевые слова:

особое предельное состояние, аварийные воздействия, стадия разрушения, изгибаемые эле-

Key words:

particular limit state, emergency exposure, the stage of destruction, bent elements, frame construction, an

менты, рамные конструкции, анкеровка, неупругие деформации сжатого бетона, темпы снижения несущей способности, прогрессирующее обрушение, перераспределение усилий

choring, inelastic deformation of compressed concrete, the rate of decline in bearing capacity, progressive collapse, redistribution of effort

Последние 3-4 десятилетия научные коллективы многих стран разрабатывают на основе проводимых исследований эффективные и, вместе с тем, малозатратные способы защиты от прогрессирующего обрушения конструкций при (отказе) разрушении одного или нескольких несущих элементов здания. Подобная расчетная ситуация вызвана, как правило, аварийным воздействием, ранее не предусмотренным нормативными документами. Защита от этих воздействий особенно актуальна для современных многоэтажных железобетонных зданий с массовым нахождением людей.

В настоящее время выходит в свет ряд нормативных документов, призванных обеспечить комплексную защиту зданий и сооружений. К ним относятся:

- СП 132.13330.2011 Обеспечение антитеррористической защищенности зданий и сооружений.

Общие требования проектирования;

- СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия.

Кроме того, отдельные положения, связанные с защитой от прогрессирующего обрушения, содержатся и в других нормативных документах, например, в ГОСТ 27751-2014, СП 56.13330.2011.

С участием авторов статьи разрабатывался Свод правил, регламентирующий основные положения по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Эта работа весьма актуальна, поскольку расчеты и конструктивные меры, направленные на повышение устойчивости зданий от прогрессирующего обрушения, по действующим нормативам приводит в отдельных случаях к удорожанию строительства до 25%. Особенно характерно это для зданий со сборным железобетонным каркасом.

Одним из способов снижения затрат на повышение устойчивости зданий при аварийных воздействиях является более полный учет поведения конструкций при кратковременном действии нагрузки и характера изменения схемы работы элементов здания. Для этого необходимо допустить большее раскрытие трещин, развитие прогибов и частичное разрушение некоторых сечений, что противоречит действующим критериям предельных состояний, обеспечивающих эксплуатационную пригодность конструкций и здания. Поэтому целесообразно введение конкретных нормативов особого предельного состояния для конструкций, что и указано в ГОСТ 27751. Следует отметить, что прообраз особого предельного состояния был отмечен А.А.Гвоздевым на основе анализа состояния полуразрушенных зданий и сооружений после Великой Отечественной войны.

Подособым предельным принимается состояние, когда конструкция вследствие аварийного воздействия не полностью соответствует требованиям функциональной пригодности, но не разрушилась и препятствует прогрессирующему обрушению, участвуя в обеспечении временной пространственной устойчивости несущей системы. Это позволяет провести в первую очередь эвакуацию людей.

В качестве примера можно привести изгибаемый элемент с прогибом в пролете, в котором произошло разрушение бетона и его куски висят на надежно заанкеренной арматуре, обладающей площадью текучести и работающей как ванта.

Особое предельное состояние может возникнуть в элементах статически неопределимой систе-

мы, когда усилия перераспределяются между элементами, снижающими несущую способность с примыкающими конструкциями или при воздействии кратковременных нагрузок, которые возрастают и исчезают, как правило, за короткий промежуток времени.

Особое предельное состояние — это стадия работы конструкции после достижения максимума расчетной несущей способности по действующим нормативам предельных состояний. Для железобетонного изгибаемого элемента оно может наступить, когда наиболее напряженная часть бетона в сечении начинает разрушаться, а в растянутой арматуре напряжения могут стабилизироваться и соответствовать пределу текучести, а затем снижаться. В этом случае деформирование конструкции может быть прекращено и конструкция не обрушится.

Если оставшаяся часть нагрузки превышает несущую способность после разрушения части сжатой зоны, изгибаемая конструкция при достаточной анкеровке рабочей арматуры может превратиться в вантовую систему и повиснет на растянутой арматуре.

Реализация этого предельного состояния наиболее вероятна в рамных каркасах с высокой степенью статической неопределимости взаимодействия всех несущих элементов. Будучи реализованным в ригеле рамного каркаса, оно приведет к интенсивному перераспределению усилий в раме. Это позволит сохранить целостность рамы даже при снижении несущей способности отдельных ее элементов.

Интенсивность прироста перемещений при падении несущей способности будет зависеть от характеристик сечения и, в первую очередь, от его армирования. Из указанного следует, что для установления критериев особого предельного состояния как по прочности, так и по деформативности необходимы исследования напряженно-деформированного состояния работы конструкций в стадии, когда деформации (прогибы) превысили соответствие максимуму несущей способности.

Экспериментальные исследования на моделях фрагмента неразрезного перекрытия, показанного на рис.1, позволили подтвердить предположения о возможности установления особого предельного состояния для конструкций, деформирующихся в стесненных условиях.

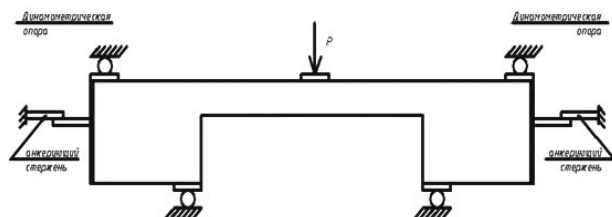


Рис.1. Схема испытания фрагмента неразрезного перекрытия

На рис.2 показана зависимость прогиба в середине пролета конструкции от внешней нагрузки.

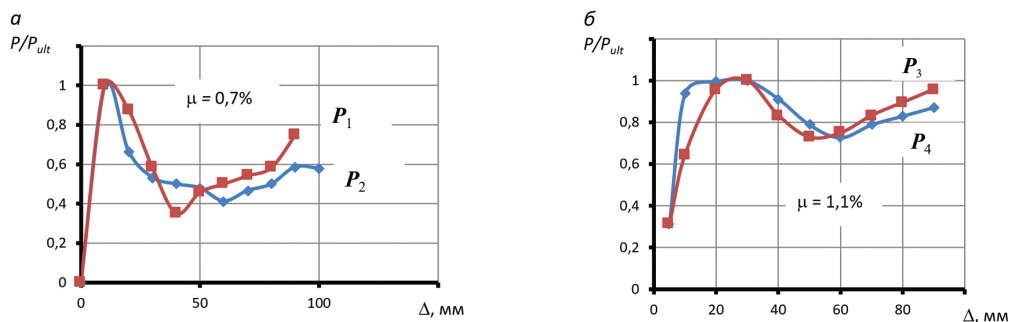


Рис.2. Зависимость прогиба фрагмента плиты в середине пролета от внешней нагрузки: P₁ - P₄ – нумерация образцов

Опытные данные показывают, что на стадии разрушения идет интенсивный прирост перемещений. При достаточной анкеровке рабочей арматуры и в условиях защемления на опорах и ограничения горизонтальных перемещений возможен второй этап роста сопротивления конструкции. По полученным данным можно отметить, что в определенных условиях можно на стадии разрушения допустить падение несущей способности до 50%.

Авторами были проведены численные исследования на основе нелинейной деформационной модели работы 6-метровой железобетонной балки сечением $b=400\text{ мм}$, $h=600\text{ мм}$ и несущей способностью M_{ult} , армированной арматурой класса А500с ($R_s=450\text{ МПа}$) в стадии последующей за пределом несущей способности.

Основной целью численного эксперимента являлось определение несущей способности и прогиба балки при постепенном разрушении сжатой зоны, а также выявление влияния процента армирования и класса бетона на деформационные характеристики балки. При расчетах условно принималось, что относительная высота сжатой зоны практически не меняется и не превышает ξ_R , а на каждом этапе происходило снижение высоты сжатой зоны на 10%. Напряжения в растянутой арматуре определялись из условия равновесия в нормальном сечении, а затем по этим значениям — остаточная несущая способность. Допустимое снижение несущей способности балки принималось в пределах 30% от исходной несущей способности M_{ult} , а предельно допустимый прогиб, при котором балка превращается в механизм, составил 1/50 от пролета.

Результаты поэтапных расчетов балки, армированной 4Ø36 А500с, класс бетона В25 с коэффициентом армирования $\mu=1,9\%$, представлены в табл. 1.

Как видно из расчетов, при снижении несущей способности на 10% прогиб балки составил 61,9 мм, или около 1/100 пролета. При снижении несущей способности балки на 30% прогиб балки составил 100,8 мм, или около 1/60 пролета.

Деформации опытных конструкций

Таблица 1

h , мм	x , мм	MH^* , мм	M/M_{ult}	f , мм	f/l
600	267,8	762,4	1,00	51,0	1/117
573,22	254,8	725,3	0,95	56,1	1/106
547,74	242,4	690,0	0,90	61,9	1/97
523,5	230,6	656,4	0,86	68,2	1/88,0
500,44	219,3	624,4	0,82	75,2	1/79,8
478,51	208,7	594,0	0,78	82,9	1/72,4
457,64	198,5	565,1	0,74	91,4	1/65,6
437,79	188,8	537,6	0,71	100,8	1/59,5

Результаты поэтапного расчёта при коэффициенте армирования, равном $\mu=2,8\%$ (6Ø36 А500с), и классе бетона В35 представлены в табл. 2.

Деформации опытных конструкций

Таблица 2

h , мм	x , мм	MH^* , мм	M/M_{ult}	f , мм	f/l
600	267,8	1143,7	1,00	75	1/80,0
573,22	254,8	1088,0	0,95	82,0	1/73,2
547,74	242,4	1035,0	0,90	90,7	1/66,2
523,5	230,6	984,6	0,86	100,1	1/59,9
500,44	219,3	936,6	0,82	110,5	1/54,3
478,51	208,7	891,0	0,78	122,1	1/49,1

Уже при первой итерации прогиб балки превышает 1/100 пролета. В целом динамика роста прогибов аналогична балке с меньшей несущей способностью, однако при снижении несущей способности на 22% прогиб балки уже достигает значения 1/50 пролета.

Результаты поэтапного расчёта при коэффициенте армирования равным $\mu=3,4\%$ (6Ø40 A500с) представлены в табл. 3.

Деформации опытных конструкций

Таблица 3

h , мм	x , мм	MH^* , мм	M/M_{ult}	f , мм	f/l
600	267,8	1411,0	1,00	91	1/65,9
573,22	254,8	1342,3	0,95	101	1/59,4
547,74	242,4	1277,0	0,90	111,9	1/53,6
523,5	230,6	1214,8	0,86	123,5	1/48,6

На третьей итерации прогиб достиг 1/50 пролета (снижение несущей способности 10%). При снижении несущей способности на 30%, прогиб балки достигает 1/33 пролета.

Результаты численного эксперимента наглядно видны на графиках (рис. 3).

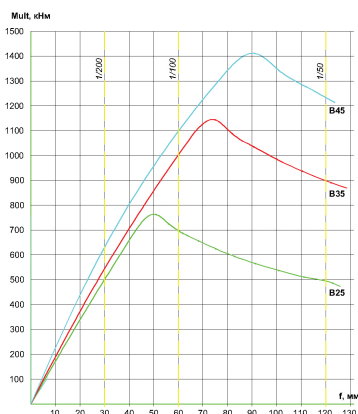


Рис.3. График зависимости прогиба 6-метровой балки от несущей способности

деформационные резервы даже после значительного раздробления сжатой зоны бетона.

2. В качестве критериев особого предельного состояния в рассматриваемом расчетном сечении конструкции целесообразно принимать:

- ограничение деформаций сжатого бетона предельными значениями ϵ_{b2} , определяемыми по билинейной диаграмме состояний при его кратковременном деформировании и значениях напряжений, равных $\phi R_{b,ser}$. Значение деформаций сжатия тяжелого бетона следует принимать равным 0,0035;
- граничные деформации растянутой арматуры для стали с физическим пределом текучести равны 0,025. При этом в обоих случаях значения напряжений принимаются не более $R_{s,ser}$;
- прогибы изгибаемых элементов для особого предельного состояния при условии обеспечения минимально допустимой длины зоны опирания во всех случаях не должны превышать 1/50 длины пролета.

3. Полученные данные могут быть применены при нормировании параметров прогрессирующего обрушения. Используя скрытые резервы железобетонных конструкций, можно допустить частичное разрушение отдельных конструкций, что не мешает эвакуации людей. Конструкции, получив-

Таким образом, численные исследования позволили предположить, что повышение класса бетонаи соответствующее увеличение армирования изгибаемого элемента приводят в стадии разрушения к более плавному падению несущей способности. Подтвердить это можно только проведением специальных экспериментальных исследований.

Обобщая полученные данные, можно отметить следующее.

1. Введение в нормы критериев и учет особого предельного напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых конструкций позволит учесть значительные прочностные и

шие повреждения во время аварийного воздействия, могут быть впоследствии отремонтированы и при необходимости – усилены. Применение описанного подхода позволит сэкономить при строительстве без ущерба для безопасности.

4. Конструкции на путях эвакуации людей в проектируемом или реконструируемом здании (сооружении) должны удовлетворять требованиям первого предельного состояния с учетом вводимых дополнительных коэффициентов.

Библиографический список

1. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия.
2. СП 63.13330.2016. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
3. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия.
4. Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжелого бетона по прочности, трещиностойкости и деформациям. – М.: Изд. АСВ, 2010.
5. Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н., Соседов К.Е. Практические методы и примеры расчета железобетонных конструкций из тяжелого бетона по СП 63.13330.2016. – М.: «Бумажник», 2017.

Авторы:

Эмиль Наумович КОДЫШ, заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «ЦНИИПромзданий», Москва

Emil KODYSH, Honoured Scientist of the Russian Federation, Honorary Member of RAACS, Doctor of Sci. (Eng), Full Professor, Chief Research Fellow of JSC 'TSNIIpromzdany', Moscow

e-mail: otks@narod.ru

тел.: +7 (495) 482-45-06

Николай Николаевич ТРЕКИН, Советник РААСН, доктор технических наук, профессор, начальник отдела конструктивных систем, АО «ЦНИИПромзданий», Москва

Nikolay TREKIN, Adviser of RAACS, Doctor of Sci (Eng), Full Professor, Head of the Department of Structural Systems in JSC 'TSNIIpromzdany', Moscow

e-mail: otks@narod.ru

тел.: +7 (495) 482-45-06