



УДК 624.012.35.45

Илшат Т. Мирсаяпов

**КЛАССИФИКАЦИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ВОСПРИНИМАЮЩИХ ПОПЕРЕЧНЫЕ СИЛЫ ПРИ МНОГОКРАТНО ПОВТОРЯЮЩИХСЯ НАГРУЖЕНИЯХ**

Среди многочисленных факторов, оказывающих наибольшее влияние на образование и развитие трещин и разрушение железобетонных изгибаемых элементов в зоне действия поперечных сил, важным и определяющим параметром является относительное

расстояние между грузом и опорой  $\frac{c_0}{h_0}$  при действии сосредоточенных нагрузок или относительная длина

элемента  $\frac{l_0}{h_0}$  при равномерно распределенной

нагрузке, где  $c_0$  - расстояние между осями опоры и груза,  $l_0$  - расчетная длина элемента. Расстояние от опоры до груза  $c_0$  общепринято называть пролетом среза, а его отношение к рабочей высоте сечения  $h_0$  -

относительным пролетом среза  $\frac{c_0}{h_0}$ .

При больших значениях  $\frac{c_0}{h_0}$ , т.е. при преобладающем влиянии изгибающего момента, разрушение происходит в зоне чистого изгиба по

нормальному сечению. С уменьшением значений  $\frac{c_0}{h_0}$ ,

а, следовательно, с увеличением влияния поперечной силы, изгибаемый элемент разрушается в пролете среза по наклонной трещине. Переход от разрушения по нормальному сечению к разрушению по наклонному сечению происходит в элементах без поперечной арматуры при относительных пролетах

среза  $\frac{c_0}{h_0} = 4 - 6$ , а в элементах с поперечной арматурой – при относительных пролетах среза

$\frac{c_0}{h_0} = 2 - 3$ .

Гиперболическая функция, полученная после обработки многочисленных экспериментальных

данных разных авторов с широким диапазоном

изменения  $\frac{c_0}{h_0}$  [1], показывает, что в элементах без

поперечной арматуры при уменьшении пролета среза с  $6 h_0$  до  $2,5 h_0$  несущая способность увеличивается

незначительно; уменьшение пролета среза от  $2,5 h_0$  до  $1 h_0$  вызывает резкое и значительное увеличение

несущей способности; при дальнейшем уменьшении пролета среза ( $c_0 < 1 h_0$ ) рост несущей способности замедляется.

Несущая способность элементов с поперечной арматурой при уменьшении относительного пролета среза увеличивается более плавно [2].

Загружение равномерно распределенной нагрузкой не вносит принципиальных изменений в закономерности процессов трещинообразования и разрушения железобетонных изгибаемых элементов. Разрушение элементов по наклонному сечению происходит по критической наклонной трещине, вершина которой располагается на расстоянии  $(0,2 - 0,3)l_0$  от опоры. Исчерпание несущей способности происходит в результате раздробления бетона в сжатой зоне над вершиной наклонной трещины. Основным параметром, влияющим на несущую способность при

загружении равномерно распределенной нагрузкой – относительная длина пролета балки  $\frac{l_0}{h_0}$ . В целом,

зависимость несущей способности от  $\frac{l_0}{h_0}$  носит такой

же характер, как и в случае нагружения сосредоточенными силами от относительного пролета

среза  $\frac{c_0}{h_0}$ , сохраняя общую тенденцию уменьшения несущей способности с увеличением  $\frac{l_0}{h_0}$  и переходом

в дальнейшем к разрушению по нормальному сечению.



А.С. Залесов [3], учитывая эту закономерность, предложил первую классификацию при статическом нагружении для железобетонных элементов, работающих на восприятие поперечных сил. Железобетонные изгибаемые элементы при действии поперечных сил по этой классификации в зависимости

от  $\frac{c_0}{h_0}$  были поделены на две группы:

1) Короткие элементы, при  $\frac{c_0}{h_0} \leq 1$ . Разрушение

таких элементов происходит в наклонной полосе между грузом и опорой;

2) Длинные элементы, при  $\frac{c_0}{h_0} > 1$ . Разрушение таких

элементов происходит с образованием критической наклонной трещины в зоне действия поперечных сил.

Впоследствии эта классификация была видоизменена [2], но суть и критерий классификации остались прежними. Таким образом, классификация железобетонных изгибаемых элементов, работающих на восприятие поперечных сил при статическом

нагружении, в зависимости от  $\frac{c_0}{h_0}$  выглядит так [2]:

1) Элементы, разрушающиеся в результате раздробления сжатой зоны над критической наклонной трещиной;

2) Элементы, разрушающиеся в результате среза бетона сжатой зоны над критической наклонной трещиной;

3) Элементы, разрушающиеся в результате раздробления бетона в наклонной полосе между опорой и грузом.

В качестве критерия классификации была принята форма разрушения элементов по бетону сжатой зоны, в рамках которой находят свое отражение все основные закономерности сопротивления – характер трещинообразования, деформирования, напряженно-деформированное состояние бетона, продольной и поперечной арматуры.

Наряду с перечисленными выше формами разрушения по бетону сжатой зоны элементы каждой из классифицируемых групп могут разрушаться по растянутой зоне до достижения предельного состояния в бетоне. Разрушение по растянутой зоне является практически одинаковым для всех трех групп классификаций, т.е. это является общим признаком, и оно может произойти либо в результате достижения предельного состояния в продольной арматуре в месте пересечения с критической наклонной трещиной либо в результате потери сцепления продольной арматуры с бетоном на приопорном участке за критической

наклонной трещиной.

В конструктивных схемах гражданских и промышленных зданий первую группу составляют элементы балочного, консольного и других типов прямоугольного, таврового, двутаврового и т.д. поперечного сечений, загруженные равномерно распределенной нагрузкой или сосредоточенными силами, расположенными на расстоянии  $c_0 > (2 - 2,2)h_0$  от опоры. Вторую группу составляют аналогичные по конструкции элементы с пролетом среза  $1,2h_0 < c_0 < 2h_0$ . Третью группу прежде всего составляют опорные зоны обычных балок, загруженные сосредоточенными силами, расположенными вблизи опор, пролет среза которых составляет  $c_0 < 1,2h_0$ . К этой группе можно отнести также так называемые короткие элементы: короткие консоли колонн, подрезки ригелей у опор, перемычки двухветвевых колонн, стеновые панели, работающие в своей плоскости и другие подобные элементы типа балок-стенок.

В областях перехода от одной группы к другой форма разрушения элемента зависит от многих факторов – прочности бетона, содержания продольной и поперечной арматуры, формы поперечного сечения и т.д.

Усталостные испытания железобетонных балок при различных пролетах среза позволяют в зависимости

от  $\frac{c_0}{h_0}$  выделить также три формы усталостного

разрушения железобетонных изгибаемых элементов, работающих на восприятие поперечных сил при многократно повторяющихся нагружениях. При этом, загрузке осуществлялось сосредоточенными силами, т.к. такой тип загрузки является наиболее распространенным видом фактического нагружения и наиболее опасным и показательным случаем работы свободно опертых балок. При этом определяющий

параметр – относительный пролет среза  $\frac{c_0}{h_0}$  –

существенно влияет на характер трещинообразования, форму усталостного разрушения и несущую способность балки. В целом, закономерность

изменения от  $\frac{c_0}{h_0}$  сохраняется такой же, что и при

статическом нагружении, т.е. с уменьшением  $\frac{c_0}{h_0}$

происходит увеличение несущей способности изгибаемых элементов при циклическом нагружении, но в формах и механизмах разрушения имеются



некоторые отличия и нюансы. Поэтому, если классификацию изгибаемых элементов, составленную для статического нагружения, применить для элементов, нагруженных циклической нагрузкой, то она в какой-то мере будет условной. Дело в том, что при статическом нагружении при достижении предельного состояния в элементе, при разрушении по сжатой зоне, считается, что в поперечной арматуре напряжения достигают предела текучести (и в дальнейшем не увеличиваются) и разрушение происходит в момент достижения напряжениями в бетоне предела прочности, т.е. как в элементах с поперечной арматурой, так и в элементах без поперечной арматуры статическое разрушение происходит в зависимости от

$\frac{c_0}{h_0}$ , либо от раздробления, либо от среза сжатого

бетона. Поэтому применение критерия разрушения по сжатой зоне в качестве отличительного признака при составлении вышеуказанной классификации при статическом нагружении является вполне логичным.

При многократном повторяющемся нагружении в элементах без поперечной арматуры усталостные

разрушения по сжатой зоне, в зависимости от  $\frac{c_0}{h_0}$ ,

происходят действительно либо в результате усталостного раздробления, либо усталостного разрыва и среза сжатого бетона. В этой связи для элементов без поперечной арматуры при циклическом нагружении отличительным признаком при составлении классификации можно было бы принимать критерий усталостного разрушения по сжатой зоне, в рамках которой находят свое отражение все основные закономерности усталостного сопротивления: характер образования трещин, напряженно-деформированное состояние на различных стадиях загрузки (в зависимости от количества циклов загрузки  $N$ ), формы и механизм усталостного разрушения, т.е. классификация, составленная для статического нагружения, вполне была бы приемлема и для элементов без поперечной арматуры при циклическом нагружении. Но в элементах с поперечной арматурой усталостное разрушение при надежно заанкеренной и мощной продольной арматуре начинается после достижения напряжениями в стержнях поперечной арматуры усталостной прочности (ограниченного предела выносливости на базе  $N < 2 \cdot 10^6$ ), а напряжения в бетоне при этом, как правило, остаются меньше абсолютного предела выносливости, и в результате усталостное разрушение начинается из-за усталостного разрыва стержней поперечной арматуры. Для сравнения можно еще раз напомнить, что в элементах с поперечной арматурой, при статическом разрушении, напряжения в поперечной арматуре

достигают предела текучести, но остаются целыми (не рвутся), а в бетоне - достигают предела прочности. Поэтому вышеуказанная классификация, составленная для статического нагружения, хотя и подходит для элементов без поперечной арматуры и при циклическом нагружении, но для элементов с поперечной арматурой является не совсем приемлемой.

В связи с этим необходимо найти другой критерий при составлении классификации железобетонных изгибаемых элементов, воспринимающих поперечные силы при многократно повторяющихся нагружениях.

В результате совместного действия поперечных сил и моментов железобетонный элемент в пределах пролета среза работает в условиях плоского напряженного состояния  $s_x^{\max}, s_y^{\max}, t_{xy}^{\max}$ , а

относительный пролет среза  $\frac{c_0}{h_0}$  по сути дела

определяет соотношение между максимальными значениями изгибающего момента и поперечной силы

( $\frac{c_0}{h_0} = \frac{M}{Q \cdot h_0}$ ), действующими в сечениях

изгибаемого элемента. Изменение относительного пролета среза приводит к изменению соотношения между составляющими плоского напряженного состояния, а в результате меняется характер образования и развития трещин в этой зоне, меняются механизм и форма усталостного разрушения элемента, а также и расчетная схема. Резкое увеличение несущей способности изгибаемых элементов при уменьшении относительного пролета среза можно объяснить только изменением механизма и формы разрушения.

Очевидно, что для значений  $c_0 > (2 - 2,2)h_0$  соответствуют одни форма и механизм разрушения,

для  $(1,2 - 1,4)h_0 < c_0 < 2h_0$  - другие, а для

$c_0 < (1 - 1,2)h_0$  - третьи. При  $c_0 > (2 - 2,2)h_0$  усталостное разрушение изгибаемых элементов происходит с образованием критической наклонной трещины, положение которой связано не с точками приложения действующих на элемент внешних усилий и реакций опор (местное возмущение напряженного состояния ощутимо только вблизи этих точек), а с внутренними силовыми факторами, действующими в рассматриваемых по длине пролета среза сечениях (моментами и поперечными силами). Особенностью

работы изгибаемых элементов при  $c_0 < (1 - 1,2)h_0$  является образование локальных полос напряжений, связанных с точками приложения сосредоточенных внешних усилий (груза и опорной реакции), в пределах которых и происходит усталостное разрушение. При



этом влияние внутренних силовых факторов, действующих по длине пролета среза в сечениях, незначительно. При дальнейшем уменьшении относительного пролета среза приходим к граничному

случаю, когда  $\frac{c_0}{h_0} = 0$  и  $M_{\max} = Q_{\max} = 0$ , т.е. когда

оси опоры и груза совпадают (сила находится против силы). Такое силовое действие характеризуется как местное действие нагрузки (или местное сжатие), т.е. местное действие нагрузки также входит в общую систему сопротивления железобетонных элементов действию поперечных сил. При  $(1,2 - 1,4)h_0 < c_0 < 2h_0$  изгибаемые элементы находятся на границе двух предыдущих случаев. Поэтому в этом случае проявляются особенности как первых, так и вторых, т.е. на характер образования и развития трещин в зоне действия поперечных сил при циклическом нагружении и усталостного разрушения в этой зоне оказывают влияние как внутренние силовые факторы, действующие в рассматриваемых по длине пролета среза элемента сечениях (момента и поперечные силы), так и местные возмущения напряженного состояния и концентрация напряжений в определенных зонах, связанные с точками приложения сосредоточенных внешних сил.

В этой связи в качестве критерия при составлении классификации вполне логично принимать

относительный пролет среза  $\frac{c_0}{h_0}$ . Классификацию

железобетонных изгибаемых элементов, работающих на восприятие поперечных сил при многократно повторяющихся нагрузках, в зависимости от относительного пролета среза можно представить в виде:

1) Элементы с большим пролетом среза, при  $\frac{c_0}{h_0} > 2$  ;

2) Элементы с средним пролетом среза, при  $1,2 < \frac{c_0}{h_0} < 2$  ;

3) Элементы с малым пролетом среза, при  $\frac{c_0}{h_0} < 1,2$  ;

4) Элементы с нулевым пролетом среза, при  $\frac{c_0}{h_0} = 0$  .

#### Литература

1. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. //Под общей редакцией Гвоздева А.А. – М.: Стройиздат, 1978. – 204 с.
2. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. – Киев: Будивэльник, 1989. – 105 с.
3. Залесов А.С. Сопротивление железобетонных элементов при действии поперечных сил. Теория и методы расчета прочности. //Автореферат дис... докт. техн. наук. – М., 1980. – 46 с.