



УДК 624.072

ОСОБЕННОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЯНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕЙСТВИЮ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

Образцов В.В.

Брестский государственный технический университет

Результаты исследований [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 12, 17, 18] и др. показывают, что работа железобетонных элементов при действии растягивающих и поперечных сил имеет особенности. Установлено, что при больших эксцентриситетах продольной силы (N) прочность внецентренно растянутых элементов близка к прочности изгибаемых элементов такого же сечения. На сопротивление наклонных сечений оказывают влияние соотношения между продольной и поперечной силами N/Q , последовательность их приложения к элементу. Между тем, в опытах [2] отмечено, что порядок приложения поперечных и продольных растягивающих сил не оказал существенного влияния на характер трещинообразования и предельную величину нагрузки. В исследованиях [4, 5] зафиксировано разрушение всех опытных образцов, при эксцентриситете продольной силы $e_0 \leq 0,5h_0$, от обрыва наиболее растянутой продольной арматуры при наличии сквозных трещин в бетоне. Авторы [4, 5] считают, что прочность элементов по поперечной силе при внецентренном растяжении как с большими, так и с малыми эксцентриситетами будет обеспечена, если будет обеспечена прочность нормальных сечений, при этом, проверка прочности наклонных сечений не требуется.

Нормы предусматривают одинаковый механизм исчерпания несущей способности наклонных сечений изгибаемых элементов и элементов, работающих на растяжение с изгибом. Нормативный документ [8] дает рекомендации по учету благоприятного влияния на прочность наклонных сечений усилий предварительного обжатия и отрицательного влияния – наличия продольной растягивающей силы. Согласно [8] в зависимость для определения поперечного усилия Q_b , воспринимаемого бетоном,

$$Q_b = \frac{\varphi_{b2}(1 + \varphi_t + \varphi_u)R_{bt}bh_0^2}{C}, \quad (1)$$

внесен коэффициент φ_{b2} , учитывающий влияние продольных сил. При действии продольных растягивающих сил φ_n подсчитывается по формуле:

$$\varphi_n = -0,2 \frac{N}{R_{bt}bh_0} \quad (2)$$

и принимается равным не более 0,8 по абсолютной величине.

Влияние эффекта предварительного напряжения на сопротивление элементов по наклонным сечениям при растяжении с изгибом оценено нормами, на наш взгляд, весьма осторожно. Кроме того, СНиП 2.03.01-84* не содержит рекомендаций по определению величины поперечной силы, воспринимаемой бетоном над концом наклонной трещины, для случаев, когда продольная растягивающая сила уменьшила до нуля напряжение обжатия на грани элемента до приложения поперечных сил и произошло последующее возрастание их величин до разрушающих. Исследование данного вопроса, таким образом, представляется актуальной задачей теории железобетона.

Результаты экспериментальных исследований балок при действии осевого растягивающего усилия [6] кроме СНиП 2.03.01-84*[8] сравниваем с расчетами по ряду норм [10, 11, 14, 15, 13] и предложений [16]. Для сравнения использовали формулы, применяемые при расчетах на срез элементов без поперечного армирования, подвергнутых одновременному действию изгибающего момента и осевого усилия.

В соответствии с рекомендациями МС-90 [11] на базе которых построены нормы [14] для расчета таких элементов используют формулу:

$$V_{Rd} = [0,18 k \eta_c (100 \rho_{lk} \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c - 0,15 \sigma_{cd}] b_w \cdot d, \quad (3)$$

где V_{Rd} – расчетная поперечная сила, воспринимаемая элементом без вертикального армирования;

k – коэффициент, зависящий от высоты сечения элемента и определяемый по формуле:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ при } d \text{ в мм} \quad (4)$$

ρ_{ex} – коэффициент продольного армирования, равный $A_{sl}/b_w d \leq 0,02$;
 A_{sl} – площадь продольной арматуры в расчетном сечении;
 $b_w d$ – соответственно минимальная ширина и рабочая высота сечения;
 $\gamma_c = 1,5$ – коэффициент безопасности для бетона;
 f_{ck} – нормативное сопротивление бетона;
 $\sigma_{cd} = N/A_c$ – нормальные напряжения, действующие на сечение ($N < 0$ при сжатии);
 $\eta_c = 1$ для тяжелого бетона.

Для элементов, имеющих короткий пролет среза ($a \leq 2,5 \cdot d$) формулу (3) следует применять в скорректированном виде:

$$V_{Rd} = \left[0,18k \frac{\eta_c}{\gamma_c} (100\rho_{lx} \cdot f_{ck})^{1/3} \left(\frac{2,5d}{a} \right) - 0,15\sigma_{cd} \right] b_w \cdot d \quad (5)$$

где a – расстояние от опоры до точки приложения силы в пролете.

Как видно из рис. 1 расчет по формуле (5) дает достаточно хорошее совпадение при пролете среза $a/d=2,0$ и при действии осевого сжимающего усилия. В тоже время, когда продольное усилие становится положительным (растяжение) формула (5) дает запасы, соизмеримые с результатами расчетов по СНиП 2.03.01.

В проекте СНБ 5.03.01 для расчета элементов без поперечного армирования предложена зависимость, принятая по Eurocode 2 в виде:

$$V_{Rd} = [\tau_{Rd} \cdot k(1,2 + 40\rho_{lx}) + \sigma_{cp}] b_w \cdot d \quad (6)$$

где T_{Rd} – расчетное сопротивление бетона, на срез, определяемое по формуле:

$$\tau_{Rd} = \frac{0,25f_{ctk}}{\gamma_c} \quad (7)$$

здесь f_{ctk} – нормативное сопротивление бетона растяжению;

k – коэффициент, учитывающий размеры балки, принимаемый равным в интервале $1 \leq 1,6-d(m) \leq 1,35$.

В формуле (6) сжимающие напряжения приняты со знаком "плюс".

Как видно из рис. 2 и анализа структуры расчетной формулы (6) в ней не учитывается достаточно важный фактор – длина среза. Это приводит к тому, что расчет по формуле (6) дает значительные запасы, особенно для коротких пролетов среза. Это приводит и к тому, что расчет по формуле (6) дает значительные запасы, особенно для коротких пролетов среза ($a/d=1,2$).

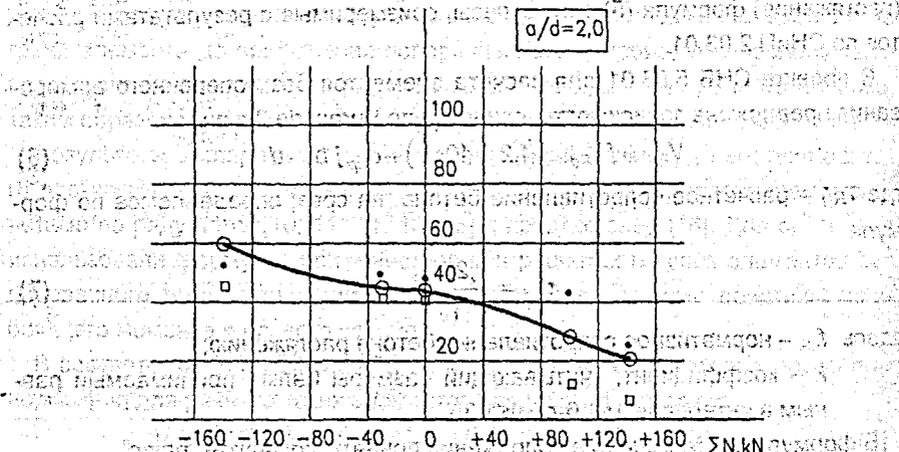
Однако представленная формула дает более высокие значения предельной поперечной силы при действии растягивающего усилия.

Для учета влияния пролета среза А.А. Кондратчиком и В.В. Туром [9] была предложена для внесения в СНБ 5.03.01-98 модифицированная формула вида:

$$V_{Rd} = \left[\tau_{Rd} \cdot k \cdot \eta_c (1,2 + 40 \rho_{lx}) \left(\frac{2,5d}{a_v} \right) + 0,15 \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d \quad (8)$$

Результаты расчетов, выполненных по формуле (8) показывают (см. рис. 2) что она дает наилучшее совпадение с опытными данными в широком интервале варьируемых параметров. Среднее значение отношения расчетных и опытных предельных поперечных сил для условий опытов составило 0,71. Как видно из сравнения опытных данных и результатов расчетов наибольшие запасы формула (8) дает при коротких пролетах среза и при действии на сечение элемента растягивающих усилий. Первое обстоятельство связано с тем, что при коротких пролетах среза наблюдается несколько отличный механизм передачи усилий в приопорной зоне элемента (непосредственно на опору), что в недостаточной мере учитывается обобщенной формулой (6).

Влияние продольного усилия на предельную поперечную силу, воспринимаемую сечением при $a/d=2,0$



● - опытные данные [6]
 □ - по формуле (5)
 △ - по предложению К. Rebeitz [16]

Рис. 1. Влияние продольного усилия на предельную поперечную силу, воспринимаемую сечением при $a/d=2,0$

Вместе с тем, формула К. Rebeitz [16], полученная по результатам обширного регрессионного анализа опытных данных в виде:

$$V_{Rd} = \left[0,4 + \sqrt{f_{ck} \cdot \rho_{lx} \left(\frac{d}{a} \right)} (2,7 - A_d) + k\sigma_{cp} \right] e_w \cdot d \quad (9)$$

Учитывая, что большинство из значимых факторов не дает более высокого результата (см. рис. 2), чем модифицированная формула (8).

Расчет в соответствии с положениями ACI Code [10] дает результаты сравнимые со СНиП 2.03.01-84* (см. рис. 2).

Таким образом, из представленного сравнения видно, что формула (9), внесенная в пр. СНБ 5.03.01-98 дает достаточно хороший безопасный результат.

По результатам экспериментальных исследований [6] и расчетного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Осевые усилия оказывают влияние на сопротивление железобетонных элементов действию перерезывающей силы. При возрастании растягивающего усилия наблюдается снижение предельной поперечной силы, воспринимаемой сечением. В выполненных опытах для предварительно напряженных элементов это снижение составило до 50%. Вместе с тем, предварительное обжатие элемента повышает значение предельной перерезывающей силы.
2. Расчет предварительно напряженных элементов на срез при действии осевого усилия в соответствии со СНиП 2.03.01-84* [38] при обеспеченных запасах недостаточно хорошо совпадает с опытными данными. Это наблюдается для всего диапазона варьируемых факторов.
3. Выполненное сравнение результатов расчетов по методикам принятым в других нормах и предложениях, показывает, что наилучшие результаты дает формула (3.6), содержащаяся в пр. СНБ 5.03.01. Вместе с тем, все предложенные зависимости имеют наибольшее отклонения от опытных данных при коротких пролетах среза. Это требует дальнейшего совершенствования расчетных зависимостей с использованием, например, положений модифицированной теории сжатых полей [40, 48].
4. Предельное сопротивление срезу элементов, подвергнутых растяжению осевым усилием зависит от режима приложения внешних усилий (продольных и поперечных).

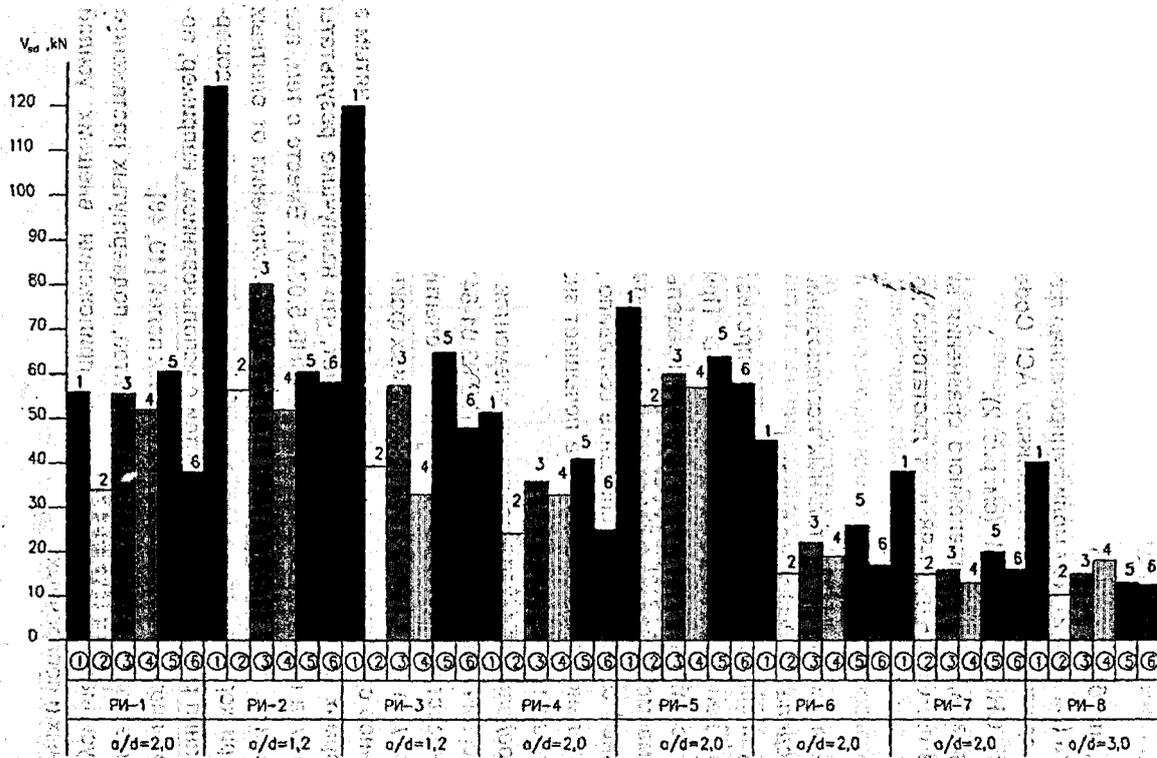


Рис. 2 Сравнение опытных и расчетных предельных поперечных сил для предварительно напряженных элементов без поперечного армирования при действии осевой силы.

1 – опытные данные [6]; 2 – СНИП 2.03.01-84* [8]; 3 – МС-90 [11]; 4 – ЕС-2 [11]; 5 – прСНБ 5.03-01-98; 6 – АСI Code [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Зорич А.С. несущая способность внецентренно растянутых железобетонных элементов из обычного и высокопрочного бетона при действии поперечных сил. Бетон и железобетон, 1976, №11, с. 34-36.
2. Калатуров Б.А., Волков Н.В. Прочность железобетонных элементов при внецентренном растяжении с поперечной силой. Сб. трудов №72 "Пространственная работа железобетонных конструкций", М., МИСИ, 1969, с. 215-225.
3. Калатуров Б.А., Докудовский С.И. Исследование предварительно напряженных железобетонных автоклавов. В кн.: Сборник трудов НИИЖБ, вып. 24, М., 1961, с. 145-214.
4. Киниакиди Г.И. К расчету на поперечную силу внецентренно растянутых железобетонных элементов при действии поперечных сил. В кн. Труды РИСИ "Прочность, деформативность и трещиностойкость железобетона", Ростов-на-Дону, 1969.
5. Кириакиди Г.И. Расчет прочности внецентренно растянутых элементов на действие поперечных сил. Бетон и железобетон, 1975, №3, с. 35-36.
6. Рочняк О.А., Образцов В.В. Экспериментальные исследования некоторых вопросов сопротивления наклонных сечений железобетонных элементов при растяжении с изгибом. // Экспериментальные исследования и расчет строительных конструкций. Сборник научных трудов / М.: ЦНИИПромзданий, 1991 – с. 116-124.
7. Рочняк О.А., Образцов Л.В., Яромич Н.Н. Вопросы сопротивления железобетонных элементов при изгибе с поперечной силой. В кн. Сборник научных трудов "Строительные конструкции" Госстрой БССР, ИсиА. Минск, 1983, с. 80-86.
8. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования. М.: Стройиздат, 1985. 89 с.
9. Тур В.В., Кондратчик А.А. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил – изд. БГТУ, Брест, 2000 – 400 с.
10. ACI (American Concrete Institute) ACI Building Code Requirements for Reinforced Concrete. ACI-318-95 Commentary (318-95R), Farmington Hill, Mich., 369 p.p.
11. CEB (Comité Euro-International du Béton, 1991): CEB-FIP Model Code 1990. – CEB Bull. d'Information, no 203, 204, 205, July, 1991 – 276 p.p.
12. Collins M.P., Mitchell D. Adebear D., Vecchio F.J. General Shear Design Method – ACI Journal – v. 93, №1, Jan.-Feb., 1996, - p.p. 36-45.
13. CSA (Canadian Standards Association) Design of Concrete Structures. CSA A23.3-94, Dec. 1994 – 200 p.p.

14. DIN 1045-1 (Entwurf) Traggerwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und konstruktion – s. 513-614.
15. Norwegian Council for Building Standardization. – Norwegian Standard NS3474E, 4ED., Nov. 1992 – 276 p.p.
16. Rebeiz K.S. Shear of Reinforced Beams without Stirrups / ASCE Struct. Eng. Div, №3, 1999 – p.p. 278-383.
17. Vecchio F.S. Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Membranes – ACI Journal v. 86, №1, Jan.-Feb., 1989, - p.p. 26-35.
18. Vecchio F.S., Collins M.P. Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear – ACI Journal, v. 83, №2, Mar.-Apr., 1986, - p.p. 219-231.