

УДК 624.012.35

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-51-57

ВЛИЯНИЕ СЖАТОЙ ЗОНЫ БЕТОНА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕЗУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

А.А. НЕВДАХ, канд. техн. наук, доц. П.В. КРИВИЦКИЙ
(Брестский государственный технический университет)

В статье анализируется влияние сжатой зоны бетона на сопротивление срезу железобетонных гибких балок. Рассматриваются расчетные модели, по которым в дальнейшем определен вклад сжатой зоны бетона в полное значение сопротивления срезу. Описаны особенности каждой модели, представлены схемы и зависимости для расчета поперечной силы в сжатой зоне бетона. Представлена экспериментальная база данных образцов и выполнен анализ по рассмотренным расчетным моделям. Отмечены варьируемые параметры в базе данных и выполнен анализ по полученным расчетным значениям поперечной силы в сжатой бетонной полосе по моделям. Получены значения вклада поперечной силы в сжатой зоне на количественный вклад в сопротивление срезу и сделаны соответствующие выводы по представленным моделям и рассмотренным параметрам.

Ключевые слова: поперечное усилие, сжатая зона, прочность бетона на сжатие, коэффициент армирования, отношение пролета среза.

Введение. В приопорной зоне железобетонные балочные элементы работают в условиях плоского напряженно-деформированного состояния. Анализ экспериментальных исследований отечественных (Залесов А.С. и др. [2]) и зарубежных авторов (Mphonde A.G.; Ahmad S.H. и Lue D.M.; Leonhardt F. и Walther R.; Angelakos D., Bentz E.C. и Collins M.P.; Pendyala R.S. и Mendis P. [3–7]) показывает, что на сопротивление срезу балок существенное влияние оказывают прочность бетона на сжатие, коэффициент поперечного и продольного армирования, вид бетона, а также геометрические размеры сечения. При этом в наклонном сечении возникает ряд внутренних усилий, воспринимающих перерезывающие силы: в сжатом бетоне над наклонной трещиной, в продольной арматуре, в поперечной арматуре, силы зацепления по берегам трещины¹.

Балочные конструкции, находясь в условиях двухосного напряженного состояния, воспринимают совместное действие нормальных и касательных напряжений. Под воздействием внешней нагрузки в железобетонных конструкциях возникает система наклонных трещин, разделяющих элемент на отдельные блоки. Эти блоки соединены в растянутой зоне продольным армированием и цельной сжатой бетонной полосой над наклонной трещиной.

На сегодняшний день проведены обширные теоретические и экспериментальные исследования для понимания поведения железобетонных конструкций под действием среза. Однако не существует общепринятой теоретической модели, которая сочетала бы точность описания и простоту расчета при проектировании большинства конструкций.

Усилие в сжатом бетоне над наклонной трещиной является одной из определяющих составляющих при нахождении сопротивления срезу элемента. Для оценки этого влияния рассматриваются балочные элементы без поперечного армирования, позволяющие исключить влияние других факторов, таких как усилие в поперечной арматуре, и получить более точную картину распределения усилий.

При этом вклад сжатой зоны бетона в сопротивлении срезу изучен недостаточно. Поэтому в работе рассматривается влияние прочности бетона на сжатие, коэффициента армирования и геометрических размеров на величину поперечного в сжатой зоне бетона.

Характеристика представленных моделей. Модель, предложенная К.Н. Reineck [1], позволяет рассчитывать «гибкие» ($a/d > 2,5$, где a – пролет среза, d – рабочая высота сечения) железобетонные балочные элементы без поперечного армирования. Согласно исследованиям К.Н. Reineck, усилие среза в основном передается в зоне контакта образовавшихся зубчатых элементов за счет трения по берегам трещины и «нагельного эффекта» в продольной арматуре. Автором предполагается простое распределение напряжений трения вдоль трещин и четко описывается результирующее напряженно-деформированное состояние в элементе, которое может быть представлено моделью (рисунок 1).

Данная модель предлагает вертикальное равновесие сил среза, и расчет поперечной силы V_c , воспринимаемой сжатым бетоном над наклонной трещиной, имеет вид [1]:

$$V_c = \frac{2}{3} c \cdot b_w \cdot \tau_n = \frac{2}{3} \frac{c}{z} \cdot V, \quad (1)$$

где $z = d - \frac{c}{3}$ – плечо пары сил;

c – высота сжатой зоны в представленной модели;

V – поперечная сила.

¹ Кривицкий, П.В. Сопротивление срезу предварительно напряженных железобетонных балок с полого отогнутыми канатами : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / П.В. Кривицкий. – Брест, 2016. – 167 л.

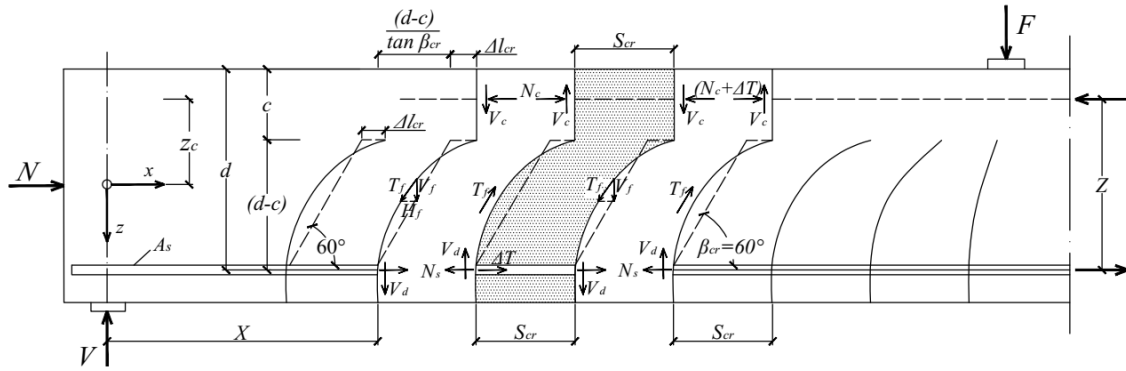


Рисунок 1. – Железобетонная конструкция с «зубчатыми» элементами [1]

Максимальный вклад сжатого бетона в сопротивлении срезу, согласно К.Н. Reineck [1], составляет до 30%.

Коллектив под руководством профессора А.С. Залесова [2] на базе метода предельного равновесия разработал модель, учитывающую совместное сопротивление продольной и поперечной арматуры, сжатой зоны бетона и трения по берегам наклонной трещины. Авторы при анализе проведенных испытаний выделили наличие зон концентраций деформаций бетона и арматуры при раздроблении бетона над наклонной трещиной и предложили диско-связевую систему. В зависимости от формы разрушения, коллектив рассматривает особенности распределения внутренних усилий в наклонной трещине и соответствующие уравнения равновесия.

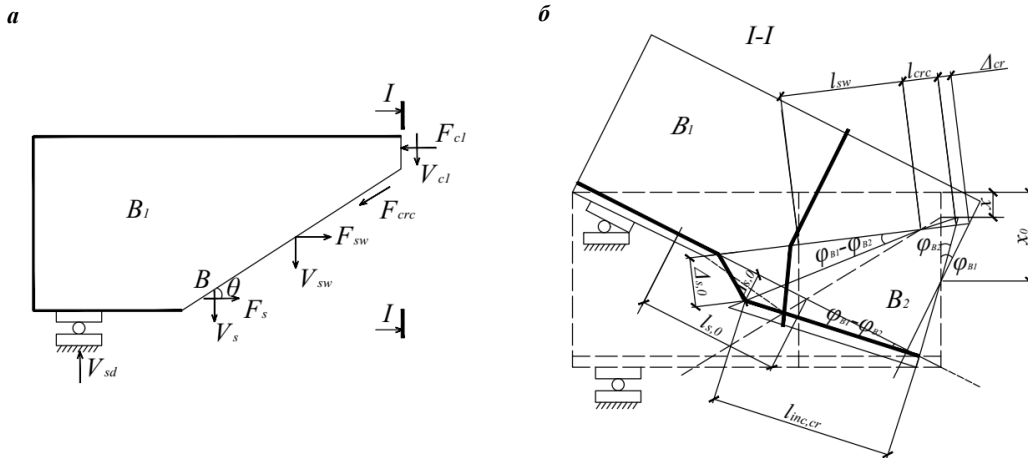
При проверке прочности сжатой зоны бетона над наклонной трещиной (рисунок 2) составляющая вклада бетона сжатой зоны составляет 25–35% от суммы всех составляющих и определяется по следующей зависимости [2]:

$$V_{cd} = 1,5 f_{ctd} \cdot b \cdot x \cdot \omega_1, \tag{2}$$

где f_{ctd} – прочность на осевое растяжение;

x – высота сжатой зоны бетона над трещиной;

ω_1 – коэффициент, отражающий отклонение расчетной эпюры от опытной по форме и значению напряжений.



а – расчетная модель; б – кинематическая схема

Рисунок 2. – Модели предельного равновесия в наклонном сечении при раздроблении бетона [2]

В советских² и национальных³ нормах получил практическое применение метод предельных усилий в расчетном наклонном сечении. Расчет железобетонных элементов на действие поперечной силы (рисунок 3) для обеспечения прочности по наклонной трещине должен производиться по наиболее опасному наклонному сечению.

Поперечное усилие $V_{Rd,ct}$, воспринимаемое элементом без вертикальной и (или) наклонной арматуры⁴, определяется по формуле (3):

$$V_{Rd,ct} = \eta_{c3} \cdot (1 + \eta_f + \eta_N) \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d, \tag{3}$$

² Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур : СНиП 2.03.04-84. – Введ. 01.01.86. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – 60 с.

³ Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-2002. – Введ. 01.07.03. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2003. – 144 с.

⁴ См. сноску 3.

где η_{c3} – коэффициент, учитывающий влияние вида бетона;
 η_f – коэффициент, учитывающий влияние сжатых полок в тавровых и двутавровых элементах,

$$\eta_f = 0,75 \frac{(b'_f - b_w) \cdot h'_f}{b_w \cdot d} \leq 0,5; \quad (4)$$

η_N – коэффициент, учитывающий влияние продольных сил, определяется по формуле:

$$\eta_N = 0,1 \frac{N_{sd}}{f_{cd} \cdot b_w \cdot d} \leq 0,5. \quad (5)$$

Значение $(1 + \eta_f + \eta_N)$ во всех случаях следует принимать не более 1,5.

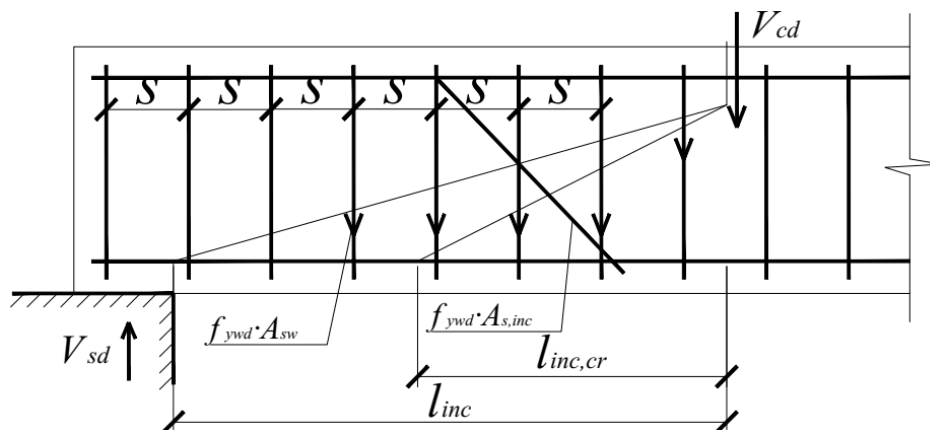


Рисунок 3. – Схема усилий в сечении, наклонном к продольной оси железобетонного элемента, при расчете его по прочности из действия поперечной силы

Анализ расчетных моделей на базе экспериментальных данных. Для определения влияния сжатой зоны бетона на сопротивление срезу была сформирована база на основе экспериментальных исследований А.Г. Mphonde [3], S.H. Ahmad и D.M. Lue [4] и F. Leonhardt и R. Walther [5]. Для сравнения выбраны балочные образцы без поперечного армирования со схожими размерами и физико-механическими характеристиками. Данная база была сформирована, чтобы учесть влияние различных факторов (прочность бетона на сжатие, коэффициент продольного армирования, отношение пролета среза) на величину перерезывающего усилия, воспринимаемого конструкцией. В таблице 1 представлены характеристики образцов, экспериментальные значения воспринимаемой поперечной силы и расчетные значения поперечных усилий в сжатой зоне бетона по рассмотренным выше моделям.

Таблица 1. – Размеры и характеристики образцов, экспериментальные значения воспринимаемой поперечной силы и расчетные значения поперечных усилий в сжатой зоне бетона

Образцы	b_w , мм	d , мм	a/d	ρ , %	c , мм	f_c , МПа	V_{exp} , кН	V_{cd1} , кН	V_{cd2} , кН	V_{cd3} , кН
Экспериментальное исследование А.Г. Mphonde [3]										
A0-3-3b	152	298	3,6	3,36	161	22,57	64,77	17,51	25,46	19,39
A0-3-3c	152	298	3,6	2,32	148	29,49	66,59	18,73	26,75	22,17
A0-7-3a	152	298	3,6	3,36	132	40,94	81,99	20,15	28,12	26,12
A0-7-3b	152	298	3,6	3,36	127	45,24	82,89	20,53	28,44	27,46
A0-11-3a	152	298	3,6	3,36	102	81,44	89,69	23,26	30,64	36,84
A0-11-3b	152	298	3,6	3,36	102	81,13	89,23	23,20	30,58	36,77
A0-15-3a	152	298	3,6	3,36	98,3	88,41	93,31	23,52	30,77	38,38
A0-15-3c	152	298	3,6	3,36	93,6	99,82	97,84	24,07	31,13	40,79
A0-15-3b	152	298	3,6	3,36	92,9	101,83	100,10	24,18	31,21	41,19
Экспериментальное исследование S.H. Ahmad и D.M. Lue [4]										
A8	127	208	3	1,45	59,5	66,1	48,87	10,87	13,45	23,23
A2	127	203	3	3,14	79,9	66,1	68,84	15,94	18,07	22,67
C2	127	184	3	4,81	85,8	69,9	75,48	16,48	19,95	21,13
Экспериментальное исследование F. Leonhardt и R. Walther [5]										
5г	190	270	3	1,75	114	28,4	77,98	21,15	25,28	29,57
6г	190	270	4	1,75	114	28,4	69,26	21,15	25,28	22,17
7-2	190	278	5	1,75	115	29,7	69,72	21,65	26,08	18,68
8-2	190	274	6	1,75	114	29,9	67,16	21,65	25,94	15,39

Примечание. В таблице использованы следующие обозначения: V_{cd1} – поперечное усилие, воспринимаемое сжатым бетоном по К.Н. Reineck [1], V_{cd2} – по А.С. Залесову [2], V_{cd3} – по нормам⁵.

⁵ См. сноску 3.

Принимая во внимание, что база была сформирована на основе экспериментальных данных различных авторов, каждая группа образцов имеет ряд варьируемых параметров. Рассматривая базу образцов A.G. Mphonde [3], можно отметить, что в данном случае в широком интервале рассматривался такой фактор, как прочность бетона на сжатие (от 22,57 МПа до 101,83 МПа). При этом отношение пролета среза и коэффициент продольного армирования оставался неизменным (исключение составляет образец A0-3-3b с коэффициентом армирования $\rho = 2,32\%$). Все опытные образцы имели размеры 152×337×2438 мм с рабочей высотой сечения 298 мм. Зависимость значений поперечных усилий от прочности бетона на сжатие представлена на рисунке 4.

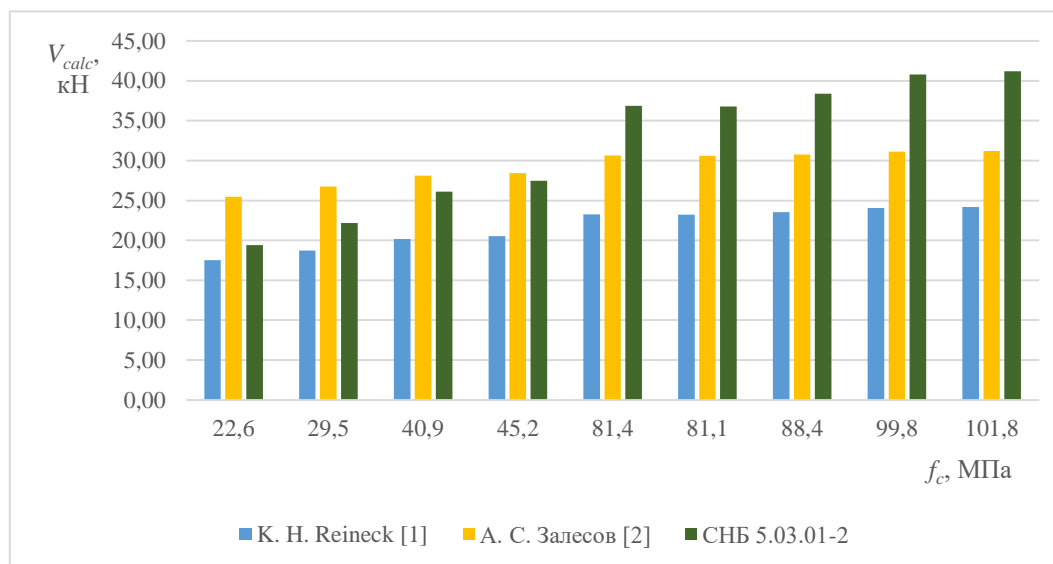


Рисунок 4. – Величина поперечной силы в сжатой зоне бетона в зависимости от прочности бетона на сжатия на основе базы испытаний Mphonde [3]

На рисунке 4 видно, что расчетная модель, согласно нормам⁶, более восприимчива к влиянию прочности бетона на сопротивление срезу, в отличие от других моделей. В таблице 2 приведены граничные расчетные значения по каждой модели, а также вклад полученных результатов в полное (общее) значение поперечной силы, полученной по результатам эксперимента.

Таблица 2. – Сводная ведомость значений на основе базы испытаний Mphonde [3]

Значения	К.Н. Reineck [1]	А.С. Залесов [2]	Нормы ⁷
Расчетное значение поперечной силы V_{calc} , кН			
max	24,18	31,21	41,19
min	17,51	25,46	19,39
middle	21,68	29,23	32,12
Вклад поперечной силы, %			
max	28,1	40,2	41,7
min	24,2	31,2	29,9
middle	25,6	34,7	37,2

В образцах S.H. Ahmad и D.M. Lue [4] варьируемыми значениями выступают коэффициент продольного армирования и рабочая высота сечения с различным вариантом размещения продольного армирования (однорядное и двухрядное расположение арматуры). Опытные балки изготавливались с размерами: ширина 127 мм и высота 254 мм. Используемые в расчете образцы имели разную рабочую высоту сечения при одинаковом отношении пролета среза за счет изменения длины балки. Величина поперечной силы в сжатой зоне бетона в зависимости от коэффициента армирования представлена на рисунке 5.

Из графика видно, что модели К.Н. Reineck [1] и А.С. Залесова [2] значительно зависят от коэффициента продольного армирования. Данное влияние также прослеживается и в процентном отношении вклада поперечной силы в полное воспринимаемое усилие (отклонения в значениях в обоих случаях 1,3%). При этом модель, рассмотренная в нормах⁸, практически не чувствительна к изменению коэффициента армирования.

⁶ См. сноску 3.

⁷ См. сноску 3.

⁸ См. сноску 3.

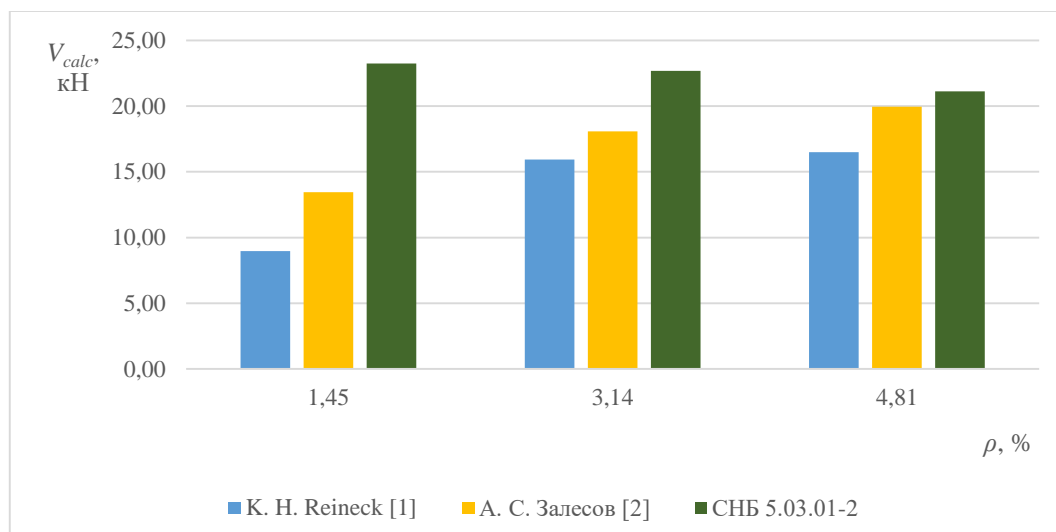


Рисунок 5. – Величина поперечной силы в сжатой зоне бетона в зависимости от коэффициента армирования на основе образцов из базы испытаний Ahmad и Lue [4]

Процентный вклад поперечной силы в сжатом бетоне уменьшается с уменьшением рабочей высоты сечения балки. Сравнение полученных значений представлено в таблице 3.

Таблица 3. – Сводная ведомость значений на основе образцов из базы испытаний Ahmad и Lue [4]

Значения	К.Н. Reineck [1]	А.С. Залесов [2]	Нормы ⁹
Расчетное значение поперечной силы V_{calc} , кН			
max	16,48	19,95	23,23
min	8,98	13,45	21,13
middle	13,80	17,16	22,34
Вклад поперечной силы, %			
max	23,2	27,5	47,5
min	21,8	26,2	28,0
middle	22,4	26,7	36,2

В третьей серии образцов F. Leonhardt и R. Walther [5] фактором вариации выступает значение пролета среза a/d . Балки имели одинаковые геометрические размеры сечения (320×190 мм), коэффициенты армирования и прочность бетона на сжатие. Величина поперечной силы в сжатой зоне бетона в зависимости от отношения пролета среза представлена на рисунке 6.

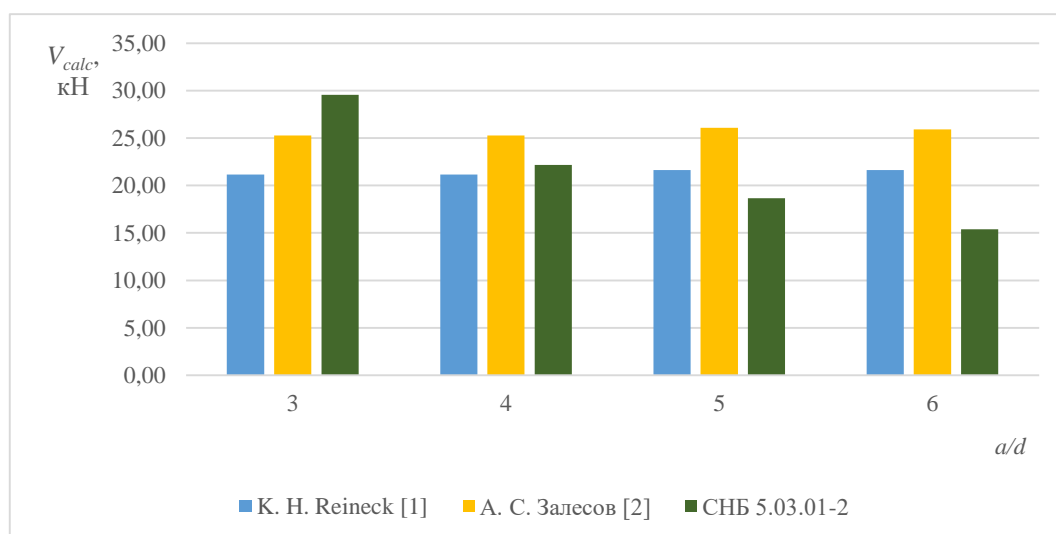


Рисунок 6. – Величина поперечной силы в сжатой зоне бетона в зависимости от отношения пролета среза на основе образцов из базы испытания Leonhardt и Walther [5]

⁹ См. сноску 3.

Как видно из графика, расчетные модели К.Н. Reineck [1] и А.С. Залесова [2] минимально зависимы от изменения пролета среза балки. При этом модель¹⁰ подтверждает положение, что при увеличении отношения пролета среза несущая способность в железобетонных балках без поперечной арматуры уменьшается. Сравнение полученных значений представлено в таблице 4.

Таблица 4. – Сводная ведомость значений на основе образцов из базы испытаний Leonhardt и Walther [6]

Значения	К.Н. Reineck [1]	А.С. Залесов [2]	Нормы ¹¹
Расчетное значение поперечной силы V_{calc} , кН			
max	21,65	26,08	29,57
min	21,15	25,28	15,39
middle	21,40	25,64	21,45
Вклад поперечной силы, %			
max	32,2	38,6	37,9
min	27,1	32,4	22,9
middle	30,2	36,2	29,9

По результатам проведенного анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. В модели К.Н. Reineck [1] в общем случае значения поперечного усилия, воспринимаемого сжатой зоной, составляют от 21,8% до 32,2% от полного значения. Автор подчеркивает, что максимальный вклад поперечного усилия сжатой зоны бетона может быть не более 30%. Данное утверждение подтверждается результатами расчета на базе экспериментальных исследований А.Г. Mphonde [3] и С.Н. Ahmad и D.M. Lue [4]. Для базы F. Leonhardt и R. Walther [5] значения получились больше заявленных К.Н. Reineck (среднее значение 30,2%). Отклонение расчетных значений от экспериментальных составляет 4,0%, 1,3% и 5,1% соответственно.

2. Модель, разработанная авторами [2], оценивает вклад сжатой зоны бетона от 26,2% до 40,2% от полного значения сопротивления срезу. Отклонения значений составляют 9,0%, 1,3% и 6,2% для каждой из рассмотренных баз.

3. Модель¹² имеет большой разброс значений: от 22,9% до 47,5%. При этом проценты отклонения составляют: 11,7%, 19,5% и 15,0%. Модель рассчитывает полную поперечную силу, воспринимаемую элементом без поперечного армирования. Но из-за недостаточного учета влияния всех указанных ранее факторов, значения имеют существенное расхождение с экспериментальными данными.

Заключение. Все рассматриваемые выше в статье параметры оказывают количественное влияние на значение поперечной силы в сжатой зоне бетона. В работе показано, что каждая представленная модель по-своему чувствительна к вариациям заданных параметров: изменение прочности бетона на сжатие влияет во всех рассмотренных моделях; коэффициент продольного армирования оказывает меньше влияния на модель¹³, чем на другие модели; изменение пролета среза имеет минимальное воздействие на модели [1] и [2]. По результатам анализа получено, что вклад сжатой зоны бетона в сопротивление срезу составляет от 21,8% до 47,5%. При этом не исследовано влияние других составляющих сопротивления срезу на величину поперечного усилия в сжатой зоне бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reineck, K.H. Ultimate Shear Force of Structural Concrete Members without Transverse Reinforcement Derived from a Mechanical Model / K.H. Reineck // *ACI Structural Journal*. – 1991. – Vol. 88, № 5. – P. 592–602.
2. Залесов, А.С. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил / А.С. Залесов, Ю.А. Климов. – Киев : Будівельник, 1989. – 104 с.
3. Mphonde, A.G. Use of Stirrup Effectiveness in Shear Design of Concrete Beams / A.G. Mphonde // *ACI Structural Journal*. – 1989. – Vol. 86, № 5. – P. 541–545.
4. Ahmad, S.H. Flexure-Shear Interaction of Reinforced High-Strength Concrete Beams / S.H. Ahmad, D.M. Lue // *ACI Structural Journal*. – 1987. – Vol. 84, № 4. – P. 330–341.
5. Leonhardt, F. Schubversuche an Einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubwehrung zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit und der Oberen Schubspannungsgrenze / F. Leonhardt, R. Walther. – Berlin : Wilhelm Ernst & Sohn, 1962. – 84 s.
6. Angelakos, D. Effect of Concrete Strength and Minimum Stirrups on Shear Strength of Large Members / D. Angelakos, E.C. Bentz, M.P. Collins // *ACI Structural Journal*. – 2001. – Vol. 98, № 3. – P. 290–300.
7. Pendyala, R.S. Experimental Study on Shear Strength of High-Strength Concrete Beams / R.S. Pendyala, P. Mendis // *ACI Structural Journal*. – 2000. – Vol. 97, № 4. – P. 564–571.

REFERENCES

1. Reineck, K.H. (1991). Ultimate Shear Force of Structural Concrete Members without Transverse Reinforcement Derived from a Mechanical Model. *ACI Structural Journal*, 88 (5), 592–602.

¹⁰ См. сноску 3.

¹¹ См. сноску 3.

¹² См. сноску 3.

¹³ См. сноску 3.

2. Zalesov, A.S. (1989). *Prochnost' zhelezobetonnykh konstruksii pri deistvii poperechnykh sil*. Kiev: Budivel'nik (In Russ.).
3. Mphonde, A.G. (1989). Use of Stirrup Effectiveness in Shear Design of Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 86 (5), 541–545.
4. Ahmad, S.H. & Lue, D.M. (1987). Flexure-Shear Interaction of Reinforced High-Strength Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 84 (4), 330–341.
5. Leonhardt, F. & Walther, R. (1962). *Schubversuche an Einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne SchubbeWehrung zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit und der Oberen Schubspannungsgrenze*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn. (in German).
6. Angelakos, D., Bentz, E.C. & Collins, M.P. (2001). Effect of Concrete Strength and Minimum Stirrups on Shear Strength of Large Members. *ACI Structural Journal*, 98 (3), 290–300.
7. Pendyala, R.S. & Mendis, P. (2000). Experimental Study on Shear Strength of High-Strength Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 97 (4), 564–571.

Поступила 24.09.2022

THE INFLUENCE OF CONCRETE COMPRESSION ZONE ON THE SHEAR RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

A. NEVDAKH, P. KRIVITSKIY
(*Brest State Technical University*)

The paper analyzes the effect of the compressed zone of concrete on the shear resistance of reinforced concrete flexible beams. The calculation models are considered, by which the contribution of the compressed zone of concrete to the total value of the shear resistance is further determined. The features of each model are described, and schemes and dependencies for calculating the transverse force in the compressed zone of concrete are presented. The experimental database of specimens is presented and the analysis by the considered calculation models is carried out. Varying parameters in the database are marked and the analysis by the obtained calculated values of transverse force in the compressed concrete strip by models is performed. The contribution of the transverse force in the compressed zone to the quantitative contribution to the shear resistance is indicated and appropriate conclusions are drawn on the models presented and the parameters considered.

Keywords: *shear force, compressed zone, concrete compressive strength, reinforcement factor, shear span ratio.*