

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.012.45.044

В. А. Тесля

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ РАСТЯНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОТСУТСТВИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ БЕТОНА

Трещинообразование железобетонных элементов процесс многоэтапный и сложный, от образования микротрещин до видимых трещин величиною 0,05-0,1 мм. Появление видимых трещин в растянутом бетоне растянувшись, изгибаемых элементов предшествует интенсивное образование микротрещин. Предельное удлинение армированного бетона растянутой зоны сечений равно $2R_{bt}/E_b$. Это подтверждено многократными исследованиями армированного бетона при различных $2R_{bt}/E_b$ процентах армирования. В изгибаемых элементах деформации наиболее растянутого волокна превышают предельные деформации бетона по сравнению с осевым растяжением и эти деформации зависят от процента армирования, формы сечения и особенно от класса бетона.

Для растянутых и изгибаемых элементов без предварительного напряжения момент образования трещин сравнительно небольшой и при этом нелинейные деформации бетона сжатой зоны проявляются незначительно. В этом случае эпюра напряжений в сжатой зоне близка к треугольной. В нормативной методике напряжения в бетоне растянутой зоны приняты равномерными по величине и равны R_{btser} при расчёте по второй группе предельных состояний. Фактическая эпюра напряжений в растянутом бетоне отличается от прямоугольной и имеет криволинейное очертание. Принятая прямоугольная эпюра упрощает расчёт при изгибе, а многочисленные значения момента образования трещин M_{csc} при сравнении расчётных значений и опытных даёт хорошую сходимость. При расчёте центрально растянутых элементов, чему ниже будетделено основное внимание, напряжения растяжения в бетоне будут равны в любой точке сечения. Во внецентренно растянутых элементах равномерных напряжений по всей высоте сечения, естественно не будет.

В настоящей работе разработана методика определения рабочей арматуры при расчёте прочности сечений центрального и внецентренно растянутых элементов с гарантией отсутствия трещин, элементов без предварительного напряжения арматуры.

Из множества факторов, влияющих на образование трещин для центрально и внецентренно растянутых железобетонных элементов, являются

усилия вызывающие напряжения в арматуре и бетоне. Усилия, соответственно и напряжения при которых образуются видимые минимальные трещины являются трещинообразуемые. Наступает момент предельного удлинения бетона. Для армированного бетона при расчёте железобетонных конструкций по образованию трещин независимо от насыщения элемента арматурой в нормах проектирования принято предельное удлинение бетона $2R_{bt}/E_b$. Таким образом, предполагаемое повышение предельной деформации растянутого армированного бетона при увеличении процента армирования не учитывается. Это положение подтверждено многократными исследованиями при которых не наблюдается повышение пластических свойств армированного бетона [1]. Предельные деформации растянутого бетона, равные величине $(8 \dots 12) \cdot 10^{-5}$, с запасом оценивают растяжимость бетона в сечении перед образованием в нём трещины.

Учитывая все эти особенности работы армированного бетона выразим условия прочности центрально растянутого элемента при гарантированном отсутствии трещин путём умножения расчётных сопротивлений арматуры на понижающий коэффициент $K < 1$.

Для решений любых центрально и внецентренно растянутых элементов значения коэффициента K будет зависеть от класса бетона, вида арматуры и коэффициента армирования поперечного сечения.

Из условия обеспечения прочности сечения центрально растянутых элементов:

$$kR_s A_s = R_{bt} A_b + 2aR_{bt} A_s \quad (1)$$

Тогда коэффициент

$$k = \varphi / \mu + 2a\varphi \quad (2)$$

При значениях $\varphi = R_{bt}/R_s$

$$\mu = A_s / A_b \text{ и } a = E_s / E_b.$$

Проследим изменения значения коэффициента K для бетонов широко применяемых в строительстве B20, B25, B30 и коэффициентов армирования от $\mu_{min} = 0,005$ до $\mu_{max} = 0,035$ при арматуре класса A III.

Используя значения коэффициентов K из табл. 1 можно по принятому сечению A_b и коэффици-

енту армирования μ определять продольную силу N , которую может воспринять элемент при заданном классе бетона

$$N = K\mu R_s A_b \quad (3)$$

Таблица 1. Значения коэффициентов K

№ п/п	μ	Коэффициент K для бетонов		
		B20	B25	B30
1	0,005	0,542	0,619	0,703
2	0,010	0,292	0,330	0,374
3	0,015	0,208	0,237	0,265
4	0,020	0,167	0,187	0,210
5	0,025	0,142	0,158	0,177
6	0,030	0,125	0,139	0,155
7	0,035	0,113	0,125	0,139

При известном значении продольной силы N , классе бетона и классе арматуры (обычно это класс $A III$), количество арматуры A_s определяется из условия

$$N = KR_s A_s$$

принимая оптимальный понижающий коэффициент K . Соответствующее ему значение μ позволяет определять поперечное сечение элемента

$$A_b = N/K\mu R_s.$$

При максимальном значении армирования возникает ситуация нерационального использования арматуры. Так при $\mu = 3,5\%$ и $K = 0,125$ рабочие напряжения в арматуре $\sigma_s = 45,625$ МПа при расчётных сопротивлениях $R_s = 365$ МПа арматуры класса $A III$.

Часто при расчёте прочности центрально растянутых элементов возникает потребность определения процента армирования по принятому коэффициенту снижения K , что можно определить по табл. 2.

Таблица 2. Определение процента армирования μ % по коэффициенту K

№ п/п	K	Класс бетона			
		B20	B25	B30	B35
1	0,85	0,30	0,36	0,41	0,44
2	0,75	0,35	0,41	0,47	0,51
3	0,65	0,40	0,47	0,54	0,59
4	0,55	0,48	0,57	0,65	0,71
5	0,45	0,60	0,71	0,81	0,88
6	0,35	0,80	0,94	1,08	1,16
7	0,25	1,18	1,39	0,61	1,74

Учёт усадки бетона в элементах без предварительного напряжения арматуры. Укорочение бетона от усадки может превышать предельные удлинения бетона при разрыве. При наличии препятствий для свободного укорочения бетона, чему препятствует арматура, в бетоне возникают растягивающие напряжения и при этом могут возникнуть трещины. Для ненапряженных элементов необходимо учитывать напряжения усадки

бетона. В этом случае коэффициент K будет определяться

$$k = \varphi / \mu + 2a\varphi - \sigma_{sh}/R_s \quad (4)$$

Здесь σ_{sh} - напряжения в арматуре от усадки бетона принимаемые для бетонов В35 и ниже - 40МПа при естественном твердении и 35МПа - при тепловой обработке [2]. Для арматуры класса $A III$ отношение σ_{sh}/R_s будет равно 0,109 при $\sigma_{sh} = 40$ МПа, 0,096 при $\sigma_{sh} = 35$ МПа. Так как разница небольшая, для расчётов принимаем отношение σ_{sh}/R_s в обоих случаях равным 0,10. Таким образом коэффициент K принимаем на 0,10 меньшим, что повышает процент армирования. Для класса бетона $B30$ и арматуры класса $A III$ только при $\mu = 9,8\%$ образуются первые трещины в бетоне при отсутствии других препятствий усадке кроме арматуры [1].

Для решения, когда известно только усилие растяжения N и площадь поперечного сечения A_b (изготовление конструкции в готовой опалубке) определение количества арматуры класса $A III$ и класса бетона производится следующим образом. Определяется произведение $K\mu = N/R_s A_b$, используя табл. 3 по значению $K\mu$ принимается класс бетона и коэффициент K . Тогда количество необходимой арматуры будет равно $A_s = N/KR_s$

Таблица 3. Значения $K\mu$ для определения K и класса бетона

K	B20	B25	B30	B35
0,25	0,00295	0,00348	0,00402	0,00435
0,35	0,00280	0,00329	0,00378	0,00410
0,45	0,00270	0,00320	0,00364	0,00396
0,55	0,00264	0,00314	0,00358	0,00390
0,65	0,00261	0,00310	0,00355	0,00386
0,75	0,00259	0,00308	0,00353	0,00384
0,85	0,00257	0,00306	0,00348	0,00378

Внекентренно растянутые элементы работают по другой расчётной схеме когда в поперечном сечении действуют разные напряжения по величине и при значительных эксцентрикитетах могут менять значения от растяжения, со стороны действующего усилия растяжения, до сжатия в противоположной. В этом случае необходимовести расчёт по приведённой площади сечения A_{red} , т.e есть с учётом наличия арматуры. Тогда основная исходная формула определения напряжений в бетоне более растянутой зоны сечения будет иметь вид

$$\sigma_{bt} = \frac{KR_s A_s}{A_{red}} + \frac{KR_s A_s e_0 v h}{I_{red}} \quad (5)$$

где $v = 0,5$ при симметричном армировании. В этом случае коэффициент снижения расчётных сопротивлений арматуры равен

$$K = \varphi \left[\frac{1}{1+a\mu} + \frac{6e_0}{h(1+6a\mu)} \right]^{-1} \quad (6)$$

и на уровне центра тяжести более растянутой арматуры, когда ось усилия растяжения совпадает с осью растянутой арматуры, при этом $e_0 = 0,417h$

$$K = \frac{\phi}{\mu} \left[\frac{1}{1+a\mu} + \frac{2.5}{1+6a\mu} \right]^{-1} \quad (7)$$

Если наблюдается второй случай, когда продольная сила N находится за пределами расстояния между усилиями в арматуре нижней S и верхней S' [2] и принимая значение $e_0 = \xi h$, поникающий коэффициент K будет определяться как

$$K = \frac{\phi}{\mu} \left[\frac{1}{1+a\mu} + \frac{6\xi}{1+6a\mu} \right]^{-1} \quad (8)$$

Для первого случая, когда продольная сила N находится в сечении между арматурой S и S' рекомендуется выполнять расчёт при коэффициенте, определяемом по формуле (7). Это позволяет растянутый элемент проектировать при гарантированном отсутствии трещин, используя при этом значения коэффициента K по табл. 4 и произведения $K\mu$ по табл. 5. Обе таблицы составлены при значении $e_0 = 0,417h$

Таблица 4. Значения коэффициента K по принятому армированию и классе бетона

№ п/п	μ	Коэффициент K для бетонов			
		B20	B25	B30	B35
1	0,00100	0,728	0,850	0,969	1,045
2	0,00125	0,589	0,686	0,781	0,844
3	0,00150	0,495	0,576	0,656	0,708
4	0,00175	0,428	0,498	0,566	0,611
5	0,00200	0,378	0,439	0,499	0,538
6	0,00225	0,339	0,393	0,447	0,482
7	0,00250	0,308	0,356	0,405	0,436

Стоит обратить внимание на особенности изменения коэффициента в зависимости от значения μ . При увеличении количества арматуры значительно снижаются размеры поникающих коэффициентов K .

и на уровне центра тяжести более растянутой арматуры, когда ось усилия растяжения совпадает с осью растянутой арматуры, при этом $e_0 = 0,417h$ центров K , что означает нерациональное использование арматуры. Её применяется много, а используется при низких расчётных сопротивлениях. Но при низких напряжениях в арматуре соответственно будут незначительные относительные деформации, что не вызовет образование трещин в бетоне.

Таблица 5. Значения $K\mu$ для бетонов.

№ п/п	$\mu \%$	B20	B25	B30	B35
1	0,100	0,000728	0,000850	0,000969	0,001045
2	0,125	0,000736	0,000858	0,000976	0,001055
3	0,150	0,000742	0,000864	0,000984	0,001062
4	0,175	0,000749	0,000872	0,000991	0,001069
5	0,200	0,000756	0,000878	0,000998	0,001076
6	0,225	0,000763	0,000884	0,001006	0,001085
7	0,250	0,000770	0,000890	0,001013	0,001090

Соответственный анализ использования данных по табл. 4 и 5 диктует применение армирования в пределах (0,15-0,20)%. При этом положении более рационально будет использоваться арматура при гарантированном отсутствии трещин. Так как при расчётах учитывается сопротивляемость бетона на растяжение, то сокращение площади поперечного сечения не допустимо. Значения произведений $K\mu$ при повышенном коэффициенте приведены в табл. 6.

Таблица 6. Значения $K\mu$ при повышенном проценте армирования.

№ п/п	$\mu \%$	B20	B25	B30	B35
1	0,10	0,000728	0,000850	0,000969	0,001045
2	0,50	0,000840	0,000960	0,001033	0,001160
3	1,00	0,000980	0,001100	0,001222	0,001300
4	1,50	0,001120	0,001240	0,001362	0,001440
5	2,00	0,001260	0,001380	0,001502	0,001580

Увеличение эксцентрикитета действия усилия

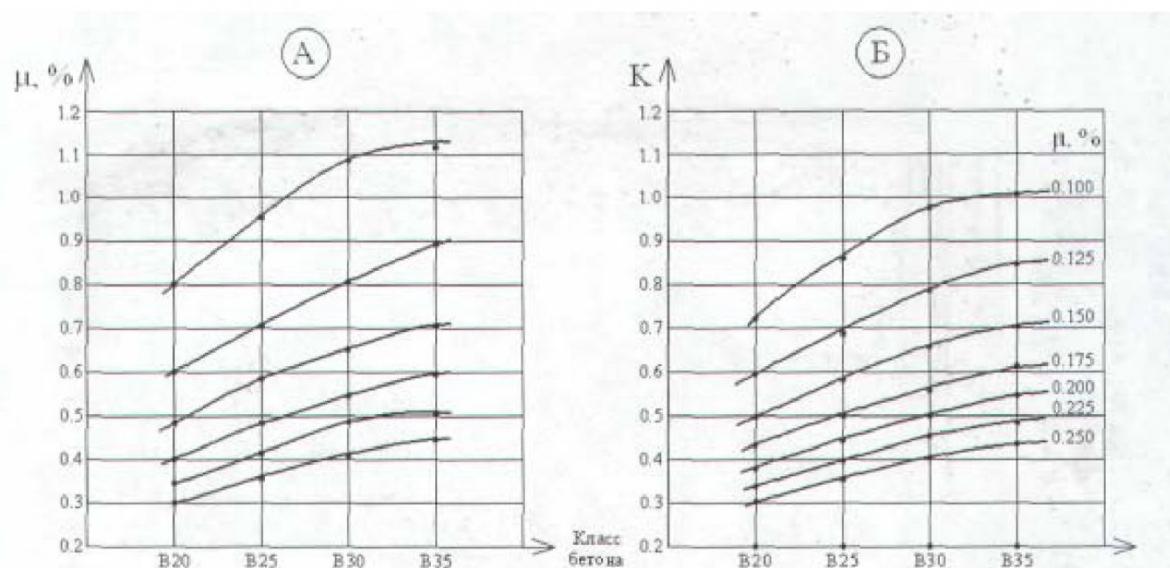


Рис. 1. Значения коэффициентов K (при центральном - (A) и внецентрочном растяжении (Б)).

N потребует значительного увеличения количества растянутой арматуры при крайне низком её использовании. Предлагаемая методика расчёта в этом случае не применима, это выразительно можно наблюдать по значениям коэффициента K в табл. 7

Таблица 7. Значения коэффициента K при $\xi = 1,5$

№ п/п	$\mu \%$	B20	B25	B30	B35
1	0,10	0,262	0,305	0,347	0,375
2	0,20	0,136	0,158	0,180	0,194
3	0,30	0,095	0,109	0,123	0,133
4	0,40	0,073	0,085	0,096	0,103
5	0,50	0,061	0,070	0,079	0,085

Коэффициент снижения расчетных сопротивлений арматуры при внецентренном растяжении значительно изменяется по сравнению с центрально растянутыми элементами.

Так при низком армировании в пределах 0,3-0,4 % при центральном растяжении коэффициент снижения $K=0,85$, для внецентренно растянутых коэффициент $K = 0,85$ определяется только в одном случае - для бетона B25 и армирования $\mu = 0,100\%$.

При армировании внецентренно растянутых элементов в пределах от 0,250 до 0,175% для бетонов B20-B35 коэффициент K имеет значение от 0,308 до 0,611.

С понижением процента армирования до 0,1%) коэффициент K возрастает от 0,728 для бетона B20, до 1,045 для бетона B35. Полные значения изменения понижающего коэффициента K приведены на графике рис. 1.

Заключение

Предлагаемая методика расчёта прочности

центрально и внецентренно растянутых железобетонных элементов при гарантированном отсутствии трещин позволяет определять количество арматуры при некотором понижении её расчётных сопротивлений, исключив таким образом расчёт по образованию трещин по второй группе предельных состояний при отсутствии предварительного обжатия бетона. Класс арматуры принят периодического профиля A400 (АП) [3].

Предлагаемым расчётом можно пользоваться при расчёте определения арматуры цилиндрических и прямоугольных резервуаров с применением тяжёлых бетонов классов по прочности на сжатие B20-B35, марок по водонепроницаемости W4-W10.

Гидростатическое давление вызывает в стенке цилиндрических резервуаров кольцевые растягивающие усилия N в горизонтальных сечениях, в резервуарах прямоугольной формы кроме усилий растяжений в угловых местах возникают незначительные изгибающие моменты, то есть наблюдаются внецентренно растянутые участки.

Подобное наблюдается в элементах раскосов строительных ферм, которые испытывают усилия растяжения при наличии в узлах соединения с верхними и нижними поясами изгибающих моментов небольшой величины.

При наличии агрессивной среды, согласно требованиям норм, к таким элементам предъявляются первой категории требований трещиностойкости, когда не допускается образование трещин [4].

Существует и ряд других железобетонных элементов, к которым можно применить расчёт определения рабочей арматуры по предлагаемой методике

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Залесов А.С. Расчёт железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям //А.С. Залесов, Э.Н. Кодыш [и др.]. М: Стройиздат, 1988.-318с.
2. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжёлого и лёгкого бетонов без предварительного напряжения арматуры. - М.:ЦНИИ промизданий Госстроя СССР, 1989. -192 с.
3. Свод правил по проектированию и строительству. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. СП-52-101-2003.-М.: ГУП «НИИЖБ» Госстроя России, 2004.-77с.
4. СНиП 2.03.01-84.* Бетонные и железобетонные конструкции.- М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.-75 с.

Автор статьи:

Тесля
Виктор Андреевич
-доц. каф. строительных конструкций КузГТУ
Тел. 8(3842)39-63-31