

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ АРМАТУРЫ ПРИ РАСЧЕТЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С АРМАТУРОЙ КЛАССА А_т500С

В настоящее время задача снижения металлоемкости железобетона актуальна в связи с подорожанием стального проката. Одним из путей решения этой проблемы является применение арматуры повышенной прочности с пределом текучести не менее 500 МПа [3]. Как показала практика, наиболее эффективным способом повышения прочностных характеристик арматуры является технология термомеханического упрочнения стали.

Используя данную технологию, на Белорусском металлургическом заводе освоено промышленное производство арматуры из углеродистой стали марки СтЗсп. Исследования данной арматуры, проведенные в Полоцком государственном университете, показали [2, 5], что по комплексу механических и технологических свойств она полностью соответствует требованиям EN 10080 и СТО АСЧМ 7-93.

Арматура А_т500С из углеродистой стали класса СтЗсп, выпускаемая БМЗ, имеет характерную диаграмму растяжения, существенно отличающуюся от диаграммы арматуры аналогичного класса из легированной стали; с очень высоким соотношением $\sigma_u/\sigma_{0.2} = 1,08$ (при 1,28 у стержней из легированной стали).

Для определения влияния диаграммы деформирования арматуры класса А_т500С ($\sigma_u/\sigma_{0.2}$) на прочность, трещиностойкость и деформативность были проведены исследования работы изгибаемых железобетонных элементов с рабочей арматурой данного класса.

С этой целью были изготовлены и испытаны 2 серии опытных балок, отличающиеся процентом армирования, который был установлен таким образом, чтобы предельные напряжения в арматуре для балок I серии были близки к временному сопротивлению, а для II серии – к среднему значению между пределом текучести и временным сопротивлением.

В каждой серии было изготовлено по две балки-близнеца, имеющие различные диаграммы растяжения рабочей арматуры: в одном случае - термомеханически упрочненную арматуру периодического профиля Белорусского металлургического завода класса А_т500С из углеродистой стали марки СтЗсп, в другом – из легированной стали марки 25Г2С. С целью чистоты эксперимента для армирования опытных элементов были отобраны стержни по возможности с одинаковой величиной предела текучести.

Таким образом, экспериментальные исследования показали [1], что характер диаграмм рабочей арматуры влияет на прочность изгибаемых балок, развитие трещин и прогибов. Можно ли теоретически учесть это влияние? Для решения этого вопроса расчетные величины разрушающих нагрузок, ширины раскрытия трещин и прогибов определяли по методике СНиП 2.03.01-84 и по методикам, предложенным в проектах СН 51-01 РФ и СНБ 5.03.01-98 с учетом фактических диаграмм растяжения арматуры, действительных геометрических размеров балок и прочности бетона в день испытания.

Расчет разрушающих нагрузок

При определении разрушающих моментов по СНБ 5.03.01-98 использовали два метода:

- упрощенный, по существу совпадающий с действующей методикой СНиП 2.03.01-84;
- общий, основанный на использовании гипотезы плоских сечений и диаграмм деформирования бетона и арматуры, представленных в наиболее простом виде - в виде двух линейных отрезков.

Для каждой методики были составлены компьютерные программы при расчете по I и II группам предельных состояний.

При расчете прочности балок по методике СНиП 2.03.01-84 и по упрощенному способу проекта СНБ 5.03.01-98 для определения действительных предельных напряжений в арматуре был установлен коэффициент γ_{s6} [4], учитывающий работу арматуры за пределом текучести, в зависимости от величины ξ и с учетом различных видов диаграмм (т.е. $\sigma_u / \sigma_{0,2}$).

$$\gamma_{s6} = \frac{(\xi - 0,05)(1 - \sigma_u / \sigma_{0,2})}{0,35} + \frac{\sigma_u}{\sigma_{0,2}} \quad \text{при } \xi \leq 0,4 \quad (1)$$

Сравнивая величины разрушающих нагрузок, вычисленные по различным методикам, можно выделить следующее:

- самые большие отклонения от экспериментальных данных дают значения, полученные при расчетах без учета коэффициента γ_{s6} по СНиП 2.03.01-84 (максимальные отклонения до +17,1 %, средние до +11,08 %) и по методу проекта СНБ 5.03.01-98 (максимальные отклонения +17,7 %, средние до +12,78 %);
- значения разрушающих моментов, вычисленные по общему случаю проекта СНБ 5.03.01-98, дают хорошую сходимость с опытными (при максимальных отклонениях: -4,2 %..+9,2 %, средних - +3,13 %);
- расчетные значения разрушающих моментов по СНиП 2.03.01-84 и по упрощенному методу проекта СНБ 5.03.01-84 с учетом коэффициента γ_{s6} , определенного по формуле (1), имеют наилучшую сходимость с опытными (максимальные отклонения от -5,9 % до +7,6 %, средние - +1,44 %).

Таким образом, при расчете прочности изгибаемых железобетонных элементов наиболее точно учитывает влияние характера диаграмм на работу элемента общий случай расчета проекта СНБ 5.03.01-98. Расчет прочности по упрощенному методу проекта СНБ 5.03.01-84 или по СНиП 2.03.01-84 обеспечивает аналогичную точность оценки прочности при расчете с коэффициентом γ_{s6} , определенного по формуле 1.

Расчет по раскрытию трещин, нормальных к продольной оси элемента

По методике СНиП 2.03.01-84 теоретические значения ширины раскрытия трещин определяли по формуле, которая распространяется при нагрузках, не вызывающих неупругие деформации в растянутой арматуре, что соответствует эксплуатационной стадии.

В проекте строительных норм Беларуси изменен расчет ширины раскрытия трещин и предусмотрены два способа: *общий* (с учетом деформационной модели) и *упрощенный*.

В общем случае средняя ширина раскрытия нормальных трещин принимается равной средним деформациям продольной растянутой арматуры, умноженным на расстояние между трещинами.

Средние деформации арматуры на участке между трещинами определяются по деформациям продольной растянутой арматуры в нормальном сечении с трещиной, умноженным на коэффициент, учитывающий неравномерность распределения деформаций арматуры на участке между трещинами.

Деформации растянутой арматуры определяли из системы расчетных уравне-

ний деформационной модели по заданным значениям изгибающего момента.

Для изгибаемых элементов прямоугольного сечения с сосредоточенной у растянутой грани элемента арматурой определение деформаций растянутой арматуры допускается производить по упрощенной схеме, рассматривая железобетонный элемент в виде сжатого пояса бетона и растянутого пояса арматуры с равномерным распределением напряжений по высоте сжатого и растянутого пояса.

Для перехода от средней величины ширины раскрытия трещин к расчетной (максимальной) используют коэффициент β . Исследования показали, что при разрушении отношение максимального значения ширины раскрытия трещины к средней составляет 1,97-2,03 (Б-I.1, Б-I.2), 1,67-1,81 (Б-I.3, Б-I.4), 2,14-2,57 (Б-II.1, Б-II.2), 1,72-1,83 (Б-II.3, Б-II.4), при эксплуатационной нагрузке ($M_u / c K_o = 0,61 M_u$) это соотношение

уменьшается до 1,44-1,65 в балках I серии, 1,34-1,68 – для II серии. В проекте СНБ значение коэффициента β принимаются в пределах от 1,3 до 1,7, что соответствуют значениям, полученным экспериментально при эксплуатационных нагрузках.

Анализ сопоставления опытных a_{exp} и расчетных $a_{crс}$ (вычисленных согласно СНиП 2.03.01-84), w_{k1} (по упрощенному способу проекта СНБ 5.03.01-98) и w_k (вычисленных по общему способу проекта СНБ 5.03.01-98) значений ширины раскрытия трещин показал, что:

- расчетные значения $a_{crс}$, w_{k1} , w_k практически совпадают между собой при нагрузках, не вызывающих пластических деформаций в растянутой арматуре. На этой стадии работы наиболее близки к экспериментальным данным ширины раскрытия трещин теоретические значения $a_{crс}$, w_k для балок I серии, $a_{crс}$ для балок II серии;
- при повышении нагрузки, когда напряжения в арматуре выше предела текучести, происходит интенсивное увеличение расчетного значения w_k по сравнению с величинами w_{k1} , $a_{crс}$, соотношение между которыми достигает 0,7-1,4. При сравнении с экспериментальными данными фактическая ширина раскрытия трещин превышает теоретические значения w_{k1} , $a_{crс}$ в 2..5 раз. Сопоставляя опытные данные и расчетные w_k , видно, что к моменту текучести арматуры практически данные совпадают ($a_{exp}/w_k = 0,86-1,12$), при дальнейшем увеличении нагрузки происходит интенсивное увеличение расчетных значений по сравнению с экспериментом и при разрушающем моменте w_k превышает фактические значения в 6..20 раз.

Теоретическая оценка деформативности

Расчетные значения прогибов согласно требованиям СНиП 2.03.01-84* определяли по формуле

$$f = \frac{1}{r} \rho_m l_o^2 \quad (2)$$

Проект СНБ 5.03.01-98 предусматривает два способа расчета: *общий и упрощенный*.

При общем случае расчета для участков железобетонных элементов с трещинами кривизну принимали равной алгебраической сумме средних деформаций крайнего волокна сжатого бетона и средних деформаций крайнего растянутого арматурного стержня на этом участке, деленной на расстояние между крайним волокном сжатого бетона и центром тяжести крайнего растянутого арматурного стержня.

Деформации сжатого бетона и растянутой арматуры в общем случае определяли из расчета уравнений деформационной модели или согласно допущению из условно упругого расчета сечения с трещиной, принимая условно упругую работу бетона и арматуры:

Упрощенный способ расчета допускает определять прогиб по формуле:

$$a_{(\infty, t_0)} = \alpha_k \frac{M_{sd} I_{eff}}{B_{(\infty, t_0)}} \quad (3)$$

где: α_k — коэффициент, от способа приложения нагрузки и схемы опирания элемента;

M_{sd} — значение расчетного момента;

$$B_{(\infty, t_0)} = \frac{E_{c,eff} I_{11}}{1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right) \left(1 - \frac{I_{11}}{I_1} \right)} \quad (4)$$

здесь: $E_{c,eff}$ — эффективный модуль упругости бетона;
 I_{11}, I_1 — соответственно, момент инерции сечения с трещиной и без трещины;

β_1, β_2 — коэффициенты, зависящие от вида арматуры и длительности действия нагрузки;

σ_s — напряжение в арматуре от действующей нагрузки;

σ_{sr} — напряжения в арматуре от нагрузки, при которой образуются трещины.

Анализ зависимостей расчетных и экспериментальных величин прогиба от изгибающего момента показал, что:

- расчетные значения прогибов f_{calc} , вычисленные по СНиП 2.03.01-84, a_{k2} , вычисленные по общему случаю расчета проекта СНБ 5.03.01-98 с учетом допущения условно упругой работы бетона и арматуры, и a_{k3} , вычисленные по упрощенной схеме расчета согласно проекту СНБ 5.03.01-98, очень близки между собой; только расчетные значения a_{k3} , вычисленные по упрощенной схеме, сразу после появления трещин начинают расти и превышают данные эксперимента II серии в 1,4-2 раза на всех этапах нагружения;
- при нагрузках, вызывающих пластические деформации арматуры, происходит интенсивное увеличение прогиба опытных балок, что не нашло отражения у вышеупомянутых расчетных величин, т.к. их динамика роста остается постоянной;
- расчетные значения прогиба a_{k1} , вычисленные по методике проекта СНБ 5.03.01-98 с учетом диаграмм деформирования, наиболее близки к экспериментальным данным: максимальные отклонения составляют в среднем до -5 % (I серия), -16 %..+20 % при нагрузках, не вызывающих пластических деформаций в арматуре. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит интенсивное увеличение теоретических величин прогиба по сравнению с опытными данными во всех образцах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально установлено снижение прочности изгибаемых элементов с арматурой класса Ат500С при уменьшении соотношения $\sigma_u / \sigma_{0,2}$. При расчете прочности изгибаемых железобетонных элементов наиболее точно учитывает влияние характера диаграмм "σ-ε" общий случай расчета проекта СНБ 5.03.01-98. Расчет прочности по упрощенному методу проекта СНБ 5.03.01-84 или по действующему СНиП 2.03.01-84 обеспечивает аналогичную точность оценки прочности при введении коэффициента γ_{S6} , определенного в зависимости от величины ξ и с учетом соотношения $\sigma_u / \sigma_{0,2}$ по формуле (1).
2. Анализ развития прогибов и трещин опытных балок показал, что характер диаграммы "σ-ε" арматуры класса Ат500С (т.е. соотношение $\sigma_u / \sigma_{0,2}$) влияет на вели-

чину прогибов и ширину раскрытия трещин лишь на той стадии работы изгибаемых элементов, когда напряжение в арматуре превышает величину условного предела текучести. Однако при эксплуатационных нагрузках, когда напряжение в арматуре не превышает предела текучести, это влияние отсутствует.

3. Расчетные значения ширины раскрытия трещин и прогибов, вычисленные по методике СНиП 2.03.01-84 и по упрощенному способу СНБ 5.03.01-98 хорошо согласуются с опытными данными при упругой работе арматуры в конструкциях. Общий случай расчета ширины раскрытия трещин и прогибов по проекту СНБ 5.03.01-98 дает возможность оценить работу балок на всех стадиях работы элемента вплоть до разрушения, при этом учитывается возможность применения арматуры с различными диаграммами " σ - ϵ " арматуры и бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волик А.Р. Влияние диаграммы деформирования арматуры на прочность, трещиностойкость и деформативность балок // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сборник научных трудов; под ред. Д.Н.Лазовского. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – С. 53-58.
2. Волик А.Р. Механические свойства арматуры класса Ат500С из углеродистой стали // Материалы международной 53-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА, Минск, 1999 г. / Белорусская государственная политехническая академия. – Минск, 1999. – С. 8.
3. Мадатян С.А. Общие тенденции производства и применения обычной и напрягаемой арматуры // Бетон и железобетон, №1, 1997. – С. 2-5.
4. Терин В.Д., Волик А.Р. Прочность балок с ненапрягаемой арматурой, класса Ат500С // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Материалы V научно-методического межвузовского семинара, Могилев, 13-16 мая 1998 г.; Под ред. А.А.Борисевича, Т.М.Пецольда. – Мн: Редакция журнала «Тыдзень», 2000. – С. 279-284.
5. Терин В.Д., Волик А.Р., Клейменов Д.И. Исследование механических и технологических свойств арматуры Ат500С из углеродистой стали // Nowe rozwiązania w budownictwie i naprawę konstrukcji budowlanych, powszechnych i zabytkowych: Материалы научно-техн. конференции, Люблин, 17-21 ноября 1996 г. / Люблинский политехнический институт. – Люблин, 1996. – С. 123-127.

УДК 624.012.45

Глухов Д.О., Пранович А.В.

МЕТОД УСТРАНЕНИЯ ПРЕРЫВНОСТИ И ЛОКАЛЬНОГО МИНИМУМА ПОВЕРХНОСТИ РЕШЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Описание проблемы

Деформационная модель постепенно завоевывает признание в науке о железобетоне. В различных модификациях она начинает применяться при расчете нормальных сечений железобетонного элемента, расчете наклонных сечений, стано-