

УДК 624.012.45

**ОБЩИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАЦИЙ
НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ КОСО СЖАТЫХ КОЛОНН,
УСИЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОБОЙМОЙ**

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ,
канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ,
канд. техн. наук, доц. Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

В данной статье приводятся предложения по совершенствованию метода расчета косо сжатых железобетонных колонн, усиленных под нагрузкой замкнутой железобетонной облоймой. За основу принимается общая нелинейная деформационная модель расчета железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов и продольных сил, использующая математическое описание диаграмм деформирования бетона и арматуры. Предлагаемая расчетная модель позволяет учесть влияние усадки бетона железобетонной облоймы усиления на перераспределение внутренних усилий в усиливаемом элементе, а предложенный расчетный метод позволяет учесть напряженно-деформированное состояние железобетонной колонны при ее усилении, различные физико-механические и реологические характеристики материалов усиливаемой и усиливающей частей конструкции.

Ключевые слова: железобетон, усиление, косое сжатие, общая нелинейная деформационная модель.

Введение. Косому внецентренному сжатию при восприятии действующих нагрузок подвергаются железобетонные угловые колонны каркасов большепролетных промышленных зданий, все колонны каркасных зданий с монолитными безбалочными и бескапитальными перекрытиями, стойки рамных фундаментов под промышленное оборудование и др. Кроме того, в процессе эксплуатации железобетонные колонны получают повреждения бетона и арматуры, изменяющие положение плоскостей симметрии в их поперечном сечении, превращая центрально и внецентренно сжатые в одной плоскости железобетонные элементы в конструктивно неоднородные косо сжатые.

Применение общего метода расчета на основе нелинейной деформационной модели к расчету прочности и деформаций косо сжатых колонн дает положительные результаты [1, 14] и позволяет отказаться от детерминированного подхода к их расчету. Также общий метод расчета прочности и деформаций на основе нелинейной деформационной модели [2; 3] позволяет получить необходимые прочностные и деформационные характеристики эксплуатируемого железобетонного элемента с учетом его фактического технического состояния [4–6].

В случае несоответствия прочностных и деформационных характеристик, показателей долговечности эксплуатируемых железобетонных конструкций предъявляемым требованиям прибегают к их усилению (восстановлению) [7]. Одним из распространенных и эффективных методов усиления сжатых железобетонных колонн является устройство железобетонных облойм с увеличением их поперечного сечения дополнительным бетоном и установкой дополнительной продольной арматуры [8]. Применение железобетонных облойм для усиления косо сжатых колонн позволяет эффективно распределять дополнительную арматуру в поперечном сечении облоймы и производить усиление под нагрузкой.

Перед усилением под нагрузкой, с частичным или полным разгрузением, железобетонные колонны эксплуатируемых зданий и сооружений имеют напряженно-деформированное состояние, отличное от первоначального после их изготовления. Это связано с предысторией их работы за период эксплуатации до момента усиления.

Дополнительные элементы железобетонной облоймы, включаемые в совместную работу с усиливаемой колонной, имеют разный возраст, разные физико-механические и реологические характеристики, включаются в работу в разные моменты времени. Фактически усиленная колонна перед нагружением превращается в многокомпонентную конструкцию, состоящую из основной части, находящейся в определенном напряженно-деформированном состоянии, и дополнительной части – в первоначальном состоянии.

Для расчета прочности и деформаций усиленных косо сжатых колонн (аналогично, как и для их исходного состояния при усилении) необходимо знать геометрические, физико-механические и реологические (развивающиеся во времени деформации усадки и ползучести бетона) характеристики дополнительных элементов усиления, момент времени и режим нагружения конструкции после усиления. Расчет прочности и деформаций железобетонных косо сжатых колонн, усиленных железобетонной облоймой, в соответствии с общим методом расчета на основе линейной деформационной модели производится в несколько этапов.

Напряженно-деформированное состояние железобетонных косо сжатых колонн перед усилением. Характерной особенностью общего метода расчета прочности и деформаций нелинейной деформационной модели является применение, кроме уравнений равновесия усилий, условий деформирования сечения (гипотезы плоских сечений) и диаграмм деформирования бетона и арматуры.

Многочисленные экспериментальные исследования показали справедливость названной гипотезы для железобетонных элементов, длина которых в 5 и более раз превышает максимальный размер поперечного сечения. В этом случае влиянием сдвигов можно пренебречь. Гипотеза плоских сечений используется в качестве допущения для железобетонных элементов, имеющих трещины в растянутой зоне, не для конкретного поперечного сечения элемента, а для осредненных продольных деформаций растянутой и сжатой зоны [9–11]. Поперечное сечение железобетонной колонны рассматривается как совокупность элементарных площадок, в пределах которых напряжения считаются равномерно распределенными.

В общем методе расчета учет работы растянутой зоны бетона после пересечения арматуры трещиной производится путем трансформирования диаграммы растяжения свободной арматуры (без бетона, в сечении с трещиной) в диаграмму, в которой напряжения σ_s приняты для сечения с трещиной, а деформации – для среднего сечения в соответствии с гипотезой плоских сечений, т.е. скорректированы с учетом коэффициента $\psi_s = 0,1 \dots 1$. Следует отметить, в [9–11] коэффициент ψ_s находится как отношение опытных средних деформаций арматуры к расчетным деформациям в сечении с трещиной при прямоугольной эпюре напряжений в сжатой зоне и неучете работы бетона на растяжение над трещиной.

После образования трещин и выключения из работы части растянутого бетона деформации бетона сжатой зоны по длине железобетонного элемента, аналогично деформациям арматуры, неравномерны: максимальное значение – в сечении с трещиной, уменьшающееся по мере удаления от ее краев. Неравномерность названных деформаций возрастает при увеличении глубины трещин и характеризуется коэффициентом ψ_c , выражающим отношение средних краевых деформаций бетона сжатой зоны к деформациям в сечении с трещиной. Согласно опытным данным [12], коэффициент ψ_c может изменяться в пределах 0.75...1, рекомендуется для всех случаев приблизительно принимать $\psi_c = 0.9$ [9].

В общем методе расчета учет неравномерности деформирования бетона сжатой зоны по длине железобетонного элемента после образования трещин производится путем трансформирования диаграммы сжатия бетона и арматуры сжатой зоны для сечения с трещиной в диаграмму, в которой напряжения σ_c и σ_{sc} приняты для сечения с трещиной, а деформации ε_c и ε_{sc} – для среднего сечения в соответствии с гипотезой плоских сечений, т.е. скорректированы с учетом коэффициента ψ_c .

Таким образом, если относительная деформация арматуры не превышает предельного значения относительных деформаций на растяжение волокна бетона на уровне рассматриваемой арматуры, то в расчет вводится диаграмма деформирования свободной арматуры и диаграмма деформирования бетона без учета неравномерности деформирования по длине элемента, в противном случае – трансформированные диаграммы.

Определение параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных косо сжатых колонн, усиленных железобетонной обоймой, при действии усадки бетона и сжимающего усилия после усиления ($N+N_{ад}$) производится *поэтапно*.

Система уравнений в двух плоскостях, состоящая из уравнений равновесия и условия совместности деформаций, описывающего положение плоскости распределения деформаций по поперечному сечению, на первом этапе расчета косо сжатой колонны имеет вид:

$$\begin{cases} \iint \sigma(\varepsilon(x, y))(y - y_0) dx dy = M_y \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y))(x - x_0) dx dy = M_x \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y)) dx dy = N \\ \varepsilon(x, y) = \varepsilon_N + \frac{1}{r_x}(x - x_0) + \frac{1}{r_y}(y - y_0) \end{cases}, \quad (1)$$

где $\sigma(x, y)$ – нормальные напряжения в точке с координатами (x, y) бетона или арматуры;

$\varepsilon(x, y)$ – относительная деформация от действия сжимающего усилия N с эксцентриситетами $e_x = M_x/N$

и $e_y = M_y/N$ в точке с координатами (x, y) бетона или арматуры;

x_0 и y_0 – координаты центра тяжести сечения поперечного сечения;

$\frac{1}{r_x}$ и $\frac{1}{r_y}$ – кривизна продольной оси колонны относительно соответственно оси x и y ;

ε_N – относительная деформация в центре тяжести поперечного сечения колонны.

Повреждения и отколы бетона железобетонной колонны учитываются исключением из расчета эквивалентных по площади элементарных площадок бетона. Учет изменения прочностных и деформационных характеристик отдельных участков бетона косо сжатой колонны учитывается зависимостью $\sigma(\varepsilon(x, y))$ для элементарных площадок этих участков, которые могут быть получены по результатам обследования. При необходимости определения деформаций конструкции, кроме того, важным является распределение участков бетона с измененными прочностными и деформационными характеристиками по длине конструкции.

Уменьшение поперечного сечения отдельных стержней арматуры вследствие коррозии учитывается использованием в расчете фактической площади поперечного сечения или эквивалентной площади при несимметричном повреждении стержней арматуры [13].

Для определения прочности косо сжатой железобетонной колонны нагрузка ступенчато увеличивается. Максимальное сжимающее усилие от внешней нагрузки, при котором выполняются условия (1), соответствует ее прочности.

Следует отметить отличие принятого критерия разрушения сжатой зоны бетона от распространенного в настоящее время ограничения предельных деформаций наиболее сжатой грани. Преимуществом является отсутствие необходимости нормирования еще одного критерия бетона – его предельной сжимаемости, что особенно важно для оценки состояния эксплуатируемых конструкций, сведения о бетоне которых ограничены. Кроме этого, работа усиленных железобетонных колонн связана с высокой степенью перераспределения усилий в поперечном сечении, и ограничение деформаций не позволяет в ряде случаев точно оценить их напряженно-деформированное состояние.

Для примера рассматривается опытная железобетонная косо сжатая колонна К-1-6 [1] с размерами поперечного сечения 201×303 мм из обычного бетона ($E_{cm} = 27 \cdot 10^3$ МПа) призмической прочностью $f_{cm} = 20,1$ МПа с симметричным распределенным по периметру армированием десятью стержнями арматуры $\varnothing 12$ мм класса А300 ($f_{yk} = 342$ МПа). Продольное сжимающее усилие N прикладывается с эксцентриситетами $e_x = 201/2 - 50,5 = 50$ мм, $e_y = 303/2 - 31,5 = 120$ мм. Расчетное предельное сжимающее усилие составляет $N_u = 506,6$ кН. Результаты расчета прочности железобетонной косо сжатой колонны К-1-6 представлены на рисунке 1, а.

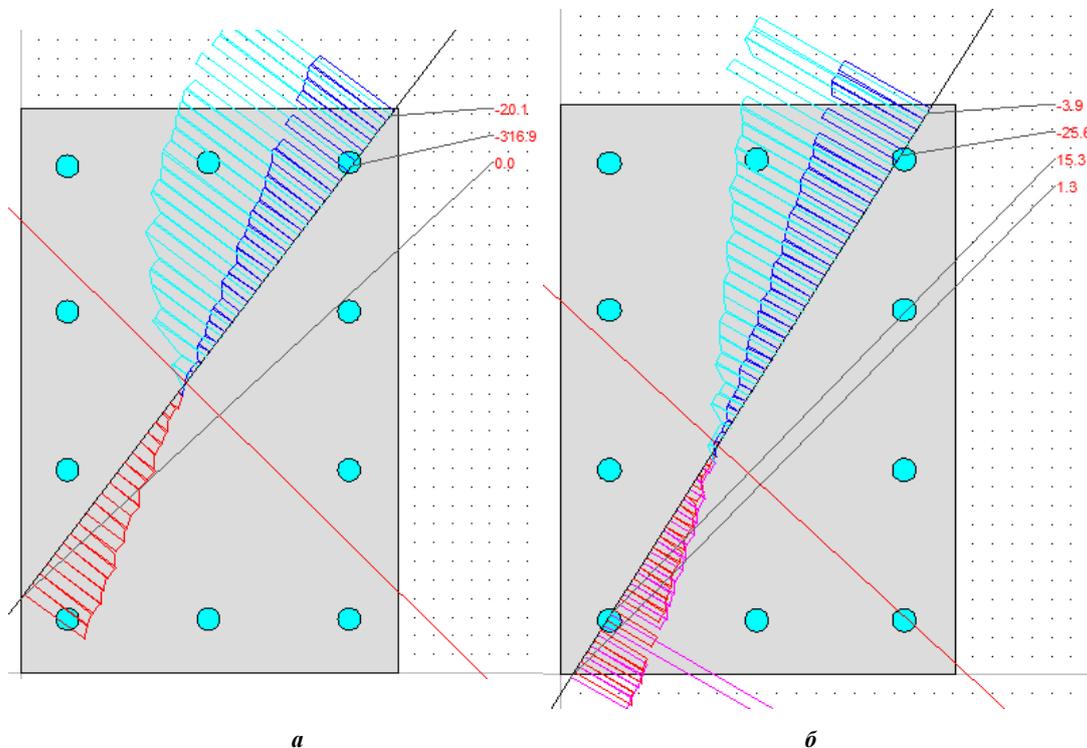


Рисунок 1. – Распределение относительных деформаций и напряжений по поперечному сечению косо сжатой железобетонной колонны: в предельном состоянии, $N_u = 506,6$ кН (а) и при $N_{cr} = 69,2$ кН (б)

При усилении косо сжатых железобетонных колонн под нагрузкой вычисленные на первом этапе расчета параметры напряженно-деформированного состояния $\sigma(x, y)_I$, $\varepsilon(x, y)_I$ при действии сжимающего усилия N будут являться исходными для расчета прочности и деформаций колонн после усиления.

На рисунке 1, б показано распределение относительных деформаций и напряжений по поперечному сечению колонны К-1-6 при действии сжимающего усилия $N_{cr} = 69,2$ кН, соответствующего усилию образования трещин в растянутой зоне колонны.

Напряженно-деформированное состояние железобетонных косо сжатых колонн, усиленных железобетонной обоймой. При усилении железобетонных косо сжатых колонн железобетонной обоймой совместная работа основной и дополнительной частей поперечного сечения усиленной конструкции обеспечивается по всей длине контакта посредством сцепления нового бетона со старым, устройством шпонок, насечки поверхности контакта, соединением дополнительной продольной арматуры обоймы с оголенной арматурой колонны посредством скоб, пересекающих контактную поверхность.

При этом в процессе твердения бетона железобетонной обоймы появляются деформации его усадки, действующие вдоль и поперек продольной оси колонны. Усиливаемая железобетонная колонна и дополнительная арматура железобетонной обоймы, вследствие ее сцепления с бетоном железобетонной обоймы, становятся внутренней связью, сдерживающей развитие этих деформаций, и источником возникающих в ней дополнительных усилий и дополнительных напряжений в бетоне. Воздействие усадки при твердении бетона всегда вызывает деформации его укорочения. Уменьшаясь в объеме, дополнительный бетон в поперечном направлении вызывает обжатие усиливаемой колонны, улучшая сцепление нового бетона со старым по контактной поверхности [8].

При усилении косо сжатых железобетонных колонн деформации усадки дополнительного бетона вызывают в ней дополнительные напряжения сжатия в продольном направлении. При этом усиливаемая колонна и дополнительная продольная арматура, сопротивляясь сжатию, вызывает растягивающие напряжения в бетоне железобетонной обоймы.

На втором этапе рассматривается поперечное сечение исходной железобетонной колонны при действии сжимающего усилия N в момент устройства обоймы с параметрами $\varepsilon(x, y)_I$, вычисленными для исходной колонны, которое подвергается воздействию вынужденных деформаций усадки. Аналогично поперечному сечению усиливаемой железобетонной колонны, поперечное сечение железобетонной обоймы разбивается на элементарные площадки.

Система уравнений на втором этапе расчета, состоящая из уравнений равновесия и условия совместности деформаций, имеет вид:

$$\begin{cases} \iint \sigma(\varepsilon(x, y))(y - y_0) dx dy + \iint \sigma_{ad}(\varepsilon_{ad}(x, y))(y - y_{0,ad}) dx dy = M_y \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y))(x - x_0) dx dy + \iint \sigma_{ad}(\varepsilon_{ad}(x, y))(x - x_{0,ad}) dx dy = M_x \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y)) dx dy + \iint \sigma_{ad}(\varepsilon_{ad}(x, y)) dx dy = N \\ \varepsilon(x, y)_{II} = \varepsilon(x, y)_I + \varepsilon_z + \frac{1}{r_{x,ad}}(x - x_{0,ad}) + \frac{1}{r_{y,ad}}(y - y_{0,ad}) + \varepsilon_{cs}(t, t_s) \\ \varepsilon_{ad}(x, y)_{II} = \varepsilon_z + \frac{1}{r_{x,ad}}(x - x_{0,ad}) + \frac{1}{r_{y,ad}}(y - y_{0,ad}) + \varepsilon_{cs}(t, t_s) \end{cases}, \quad (2)$$

где $\sigma_{ad}(x, y)$ – нормальные напряжения от действия усадки в точке с координатами (x, y) бетона или арматуры железобетонной обоймы;

$\varepsilon_{ad}(x, y)$ – относительная деформация от действия усадки в точке (x, y) бетона или арматуры железобетонной обоймы;

$x_{0,ad}$ и $y_{0,ad}$ – координаты центра тяжести поперечного сечения усиленной колонны;

$\frac{1}{r_{x,ad}}$ и $\frac{1}{r_{y,ad}}$ – кривизна продольной оси элемента от воздействия вынужденных деформаций усадки относительно соответственно оси x и y ;

ε_z – относительная деформация от воздействия усадки бетона в точке с координатами $(x_{0,ad}, y_{0,ad})$;

$\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ – относительная деформация от действия полной усадки бетона в момент времени t , имеющего возраст t_s к началу воздушно-сухого хранения (распалубливания).

Согласно [15; 16], относительную деформацию полной усадки $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ бетона в момент времени t , имеющего возраст t_s к моменту начала воздушно-сухого хранения, определяют по формуле

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s), \quad (3)$$

где $\varepsilon_{cbs}(t)$ – относительная деформация базовой усадки бетона, зависящая от прочности бетона, вида и класса прочности цемента;

$\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ – относительная деформация усадки высыхания бетона, учитывающая вид цемента и влияние относительной влажности среды эксплуатации.

При решении системы уравнений равновесия (2) общего метода расчета, относительная деформация усадки бетона $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ вводится в уравнения совместности деформаций. Расчет выполняется до равновесного состояния по напряжениям относительно центра тяжести сечения. При этом необходимо отметить, что критерии останковки итерационного процесса по продольной силе и изгибающим моментам принимаются на несколько порядков меньше, чем для расчета при силовом воздействии, поскольку речь идет о поиске равновесия при малых значениях внутренних усилий.

В результате расчета определяются параметры напряженно-деформированного состояния усиленных железобетонных колонн в их поперечном сечении, нормальном к его продольной оси, при воздействии вынужденных усадочных деформаций. Полученные на втором этапе расчета параметры напряженно-деформированного состояния железобетонной косо сжатой колонны, усиленной железобетонной обоймой $\sigma(x, y)_{II}$, $\varepsilon(x, y)_{II}$, будут являться начальными при последующем ее нагружении.

Для примера рассматривается опытная железобетонная косо сжатая колонна К-1-6, усиленная железобетонной обоймой из бетона класса $C^{25}/_{30}$ ($f_{cm} = 33$ МПа, $E_{cm} = 38 \cdot 10^3$ МПа) толщиной 80 мм, относительные деформации полной усадки бетона обоймы $\varepsilon_{cs}(t, t_s) = 0,00009$. Железобетонная обойма армирована десятью стержнями арматуры $\varnothing 12$ мм класса S500 ($f_{yk} = 500$ МПа) с модулем упругости $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа. Продольное сжимающее усилие в момент усиления колонны $N = N_{cr} = 69,2$ кН. Результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния косо сжатой колонны после усиления железобетонной обоймой при действии начального усилия N и вынужденной деформации усадки $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ представлены на рисунке 2.

Вынужденные деформации усадки бетона железобетонной обоймы усиленной косо сжатой колонны и продольной арматуры обоймы вызывают дополнительные сжимающие усилия. Дополнительное усилие сжатия в колонне действует центрально, учитывая симметричное поперечное сечение железобетонной обоймы и ее армирование. Для косо сжатой колонны это эквивалентно не только увеличению сжимающего усилия, но и уменьшению его эксцентриситета приложения. Поскольку, согласно принятой предпосылке о совместной работе усиленной колонны и железобетонной обоймы, составное поперечное сечение колонны после усиления деформируется как цельное, то изменение эксцентриситета приложения сжимающего усилия N при усилении вызывает наложение на равномерно распределенные деформации растяжения в бетоне обоймы от его усадки деформаций от изгиба составного элемента. Параметры напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении колонны до усиления находились в равновесном состоянии, после обжатия они теряют равновесие (сжатая зона колонны увеличивается, растянутая – уменьшается). В составном сечении усиленной колонны из-за возникшего неравновесного состояния появляется дополнительная кривизна, что приводит к неравномерности последствий усадки в дополнительном сечении. Относительные деформации растяжения от усадки бетона железобетонной обоймы будут больше со стороны сжатой зоны усиливаемой колонны.

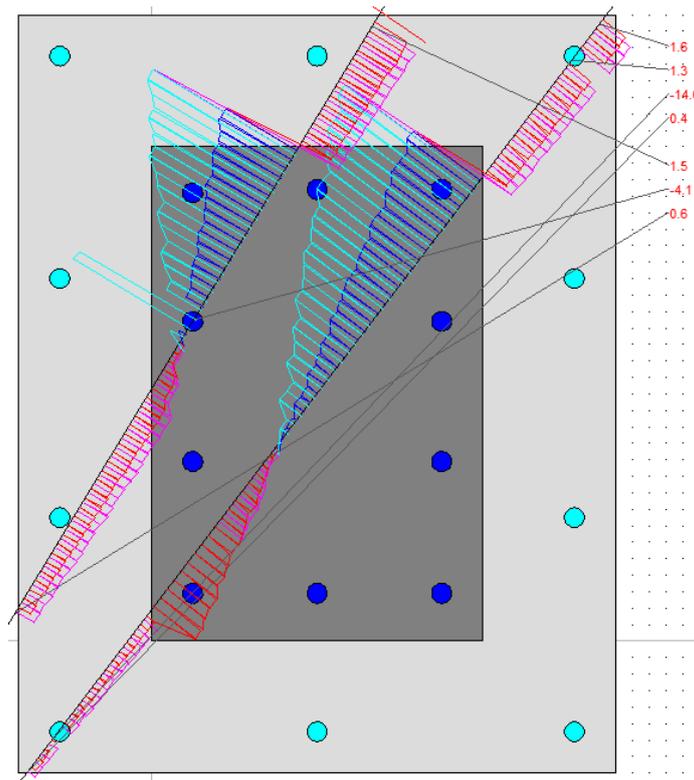


Рисунок 2. – Распределение относительных деформаций и напряжений по поперечному сечению косо сжатой железобетонной колонны, усиленной под нагрузкой железобетонной обоймой, при действии усадки

Согласно предложенной модели косо сжатой железобетонной колонны, усиленной под нагрузкой симметричной железобетонной обоймой, вынужденные деформации усадки дополнительного бетона догружают основное поперечное сечение колонны по продольному усилию и разгружают ее по изгибающему моменту (вследствие уменьшения суммарного эксцентриситета), что проявляется в уменьшении кривизны колонны в основном поперечном сечении.

Гипотеза плоских сечений для относительных деформаций всего сечения усиленной под нагрузкой железобетонной колонны, состоящей из основной (усиливаемая колонна) и дополнительной (обойма) частей не выполняется, поскольку при усилении в основной части поперечного сечения уже имеются начальные деформации $\varepsilon(x, y)_{II}$ от действия сжимающего усилия N и деформаций усадки. Принимаем гипотезу плоских сечений в постановке В.И. Мурашова – Я.М. Немировского [9–11] отдельно для дополнительной части и для приращений относительных деформаций основной части сечения колонны. Тогда относительные деформации элементарного участка основного сечения колонны находятся как сумма относительных деформаций при усилении $\varepsilon(x, y)_{II}$ (от действия усилия N и вынужденных деформаций усадки бетона) и относительных деформаций после усиления. Учитывая совместную работу основной и дополнительной части колонны, приращение деформаций на границе контакта основного и дополнительного сечения при нагружении усиленной колонны будет одинаковым, т.е. при абсолютно жестком контакте разность деформаций основного и дополнительного поперечного сечения в любой момент времени в произвольной точке сечения в зоне контакта постоянна и равна относительной деформации колонны в поперечном сечении при усилении. Такой контакт на практике обеспечивается конструктивными и технологическими мероприятиями.

С учетом наличия основной и дополнительной части поперечного сечения усиленной колонны, условий равновесия усилий и вышеназванных условий совместности деформирования запишем уравнения напряженно-деформированного состояния железобетонной косо сжатой колонны, усиленной железобетонной обоймой, при действии сжимающего усилия $(N+N_{ad})$ с эксцентриситетами e_x, e_y .

Система уравнений на третьем этапе расчета имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \iint \sigma(\varepsilon(x, y))(y - y_o) dx dy + \iint \sigma_{ad}(\varepsilon_{ad}(x, y))(y - y_{o,ad}) dx dy = M_y + M_{y,ad} \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y))(x - x_o) dx dy + \iint \sigma_{ad}(\varepsilon_{ad}(x, y))(x - x_{o,ad}) dx dy = M_x + M_{x,ad} \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y)) dx dy + \iint \sigma_{ad}(\varepsilon_{ad}(x, y)) dx dy = N + N_{ad} \\ \varepsilon(x, y)_{III} = \varepsilon(x, y)_{II} + \varepsilon_z + \frac{1}{r_{x,ad}}(x - x_{o,ad}) + \frac{1}{r_{y,ad}}(y - y_{o,ad}) \\ \varepsilon_{ad}(x, y)_{III} = \varepsilon_z + \frac{1}{r_{x,ad}}(x - x_{o,ad}) + \frac{1}{r_{y,ad}}(y - y_{o,ad}) \end{array} \right. , \quad (4)$$

где $\sigma(x, y)$ и $\sigma_{ad}(x, y)$ – нормальные напряжения от действия внецентренно приложенного в двух плоскостях усилия ($N + N_{ad}$) и усадки в точке с координатами (x, y) бетона или арматуры соответственно колонны и железобетонной обоймы;

$\epsilon_{ad}(x, y)$ – относительная деформация от действия усадки в точке (x, y) бетона или арматуры железобетонной обоймы;

$x_{o,ad}$ и $y_{o,ad}$ – координаты центра тяжести поперечного сечения усиленной колонны;

$\frac{1}{r_{x,ad}}$ и $\frac{1}{r_{y,ad}}$ – кривизна продольной оси элемента от воздействия вынужденных деформаций усадки относительно соответственно оси x и y ;

ϵ_z – относительная деформация от воздействия усадки бетона в точке с координатами $(x_{o,ad}, y_{o,ad})$;

$\epsilon_{cs}(t, t_s)$ – относительная деформация от действия полной усадки бетона в момент времени t , имеющего возраст t_s к началу воздушно-сухого хранения (распалубливания).

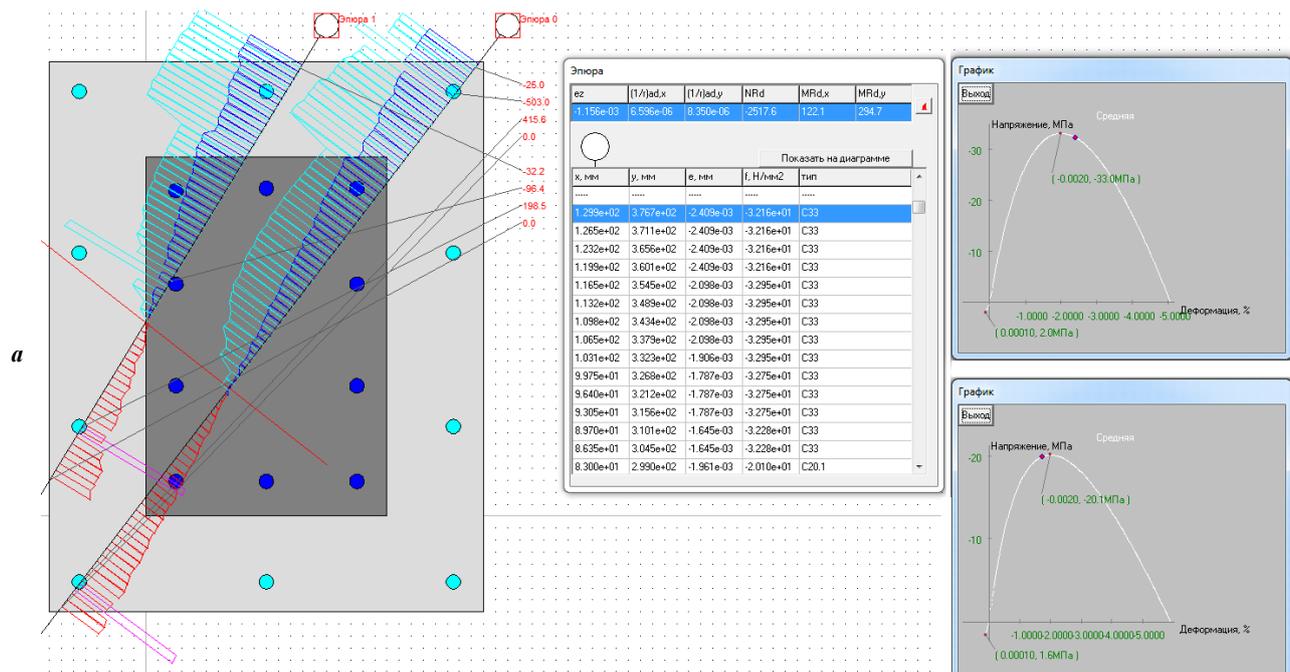
Максимальное сжимающее усилие от внешней нагрузки, при котором для усиленной колонны выполняются условия (4), соответствует ее прочности. Критерием разрушения продольной арматуры колонны или обоймы принимается достижение относительных деформаций, соответствующих их временному сопротивлению разрыву. При этом диаграммы деформирования бетона колонны и обоймы не имеют ограничений предельными относительными деформациями.

Следует отметить отличие принятого критерия разрушения сжатой зоны бетона от распространенного в настоящее время ограничения предельных деформаций наиболее сжатой элементарной площадки. Преимуществом является отсутствие необходимости нормирования еще одного критерия бетона – его предельной сжимаемости, что особенно важно для оценки состояния эксплуатируемых конструкций, сведения о бетоне которых ограничены. Кроме этого, работа усиленных железобетонных элементов связана с высокой степенью перераспределения усилий в поперечном сечении, и ограничение деформаций не позволяет в ряде случаев точно оценить напряженно-деформированное состояние нормального сечения.

Диаграммы деформирования бетона, которые используются в общем методе расчета, относятся к случаю действия кратковременных нагрузок. Для учета деформаций ползучести при расчете напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций на основе общего метода расчета необходимо математическое описание диаграмм деформирования бетона при длительном действии нагрузки. Получение диаграмм-изохроны деформирования бетона колонны и бетона обоймы при моделировании длительного действия нагрузки реализовано в программном комплексе Бета v6.0 [16].

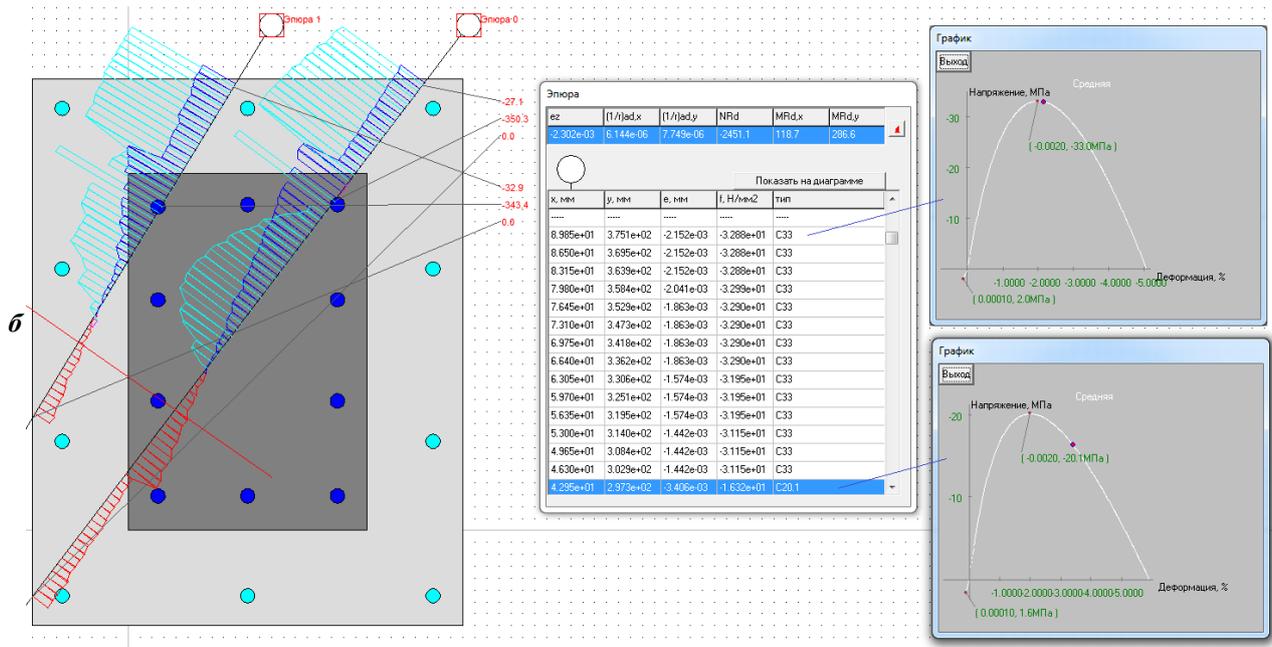
Для экспериментальной колонны К-1-6, усиленной железобетонной обоймой под нагрузкой $N = 69,2$ кН, результаты расчета прочности и распределение относительных деформаций и напряжений по ее поперечному сечению при действии кратковременной нагрузки (место приложения сжимающего усилия не изменяется: $e_x = 50$ мм, $e_y = 120$ мм) представлены на рисунке 3, а.

Для демонстрации степени перераспределения усилий в железобетонной косо сжатой колонне, усиленной под нагрузкой, принимаем усилие $N = 400$ кН перед усилением. Результаты расчета прочности и распределение напряжений по ее поперечному сечению при действии кратковременной нагрузки представлены на рисунке 3, б.



а – $N = 69,2$ кН

Рисунок 3. – Распределение относительных деформаций и напряжений в предельной стадии в железобетонной косо сжатой колонне, усиленной железобетонной обоймой под нагрузкой (начало)



$\delta - N = 400$ кН

Рисунок 3. – Распределение относительных деформаций и напряжений в предельной стадии в железобетонной косо сжатой колонне, усиленной железобетонной обоймой под нагрузкой (окончание)

Уровень нагружения косо сжатых железобетонных колонн при их усилении под нагрузкой влияет на степень перераспределения усилий в составном элементе, состоящем из колонны с начальным напряженно-деформированным состоянием от нагрузки при усилении и железобетонной обоймы.

Заключение. Общий метод расчета на основе нелинейной деформационной модели косо сжатых железобетонных колонн, усиленных железобетонной обоймой, позволяет решать практически любые задачи в области усиления конструкций, недоступные ныне применяемым методам. Метод позволяет учесть напряженно-деформированное состояние железобетонной колонны при ее усилении, различные физико-механические и реологические характеристики материалов усиливаемой и усиливающей частей конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павликов, А.Н. Общий метод расчета прочности косо сжатых колонн на основе нелинейной деформационной модели / А.Н. Павликов, О.В. Горькая // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: О.Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2020. – С. 153–172.
2. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования : метод. пособие / М-во стр-ва и жилищно-коммунального хоз-ва Рос. Федерации. – М., 2017. – 197 с.
3. Карпенко, С.Н. Модели деформирования железобетона в приращениях и методы расчета конструкций : автореф. дис ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / С.Н. Карпенко ; Науч.-исслед. ин-т строит. физики Рос. акад. архитектуры и строит. наук. – М., 2010. – 48 с.
4. Лазовский, Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений : моногр. / Д.Н. Лазовский. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 1998. – 240 с.
5. Пецольд, Т.М. Расчет усиления железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений (начало) / Т.М. Пецольд, Д.Н. Лазовский // Бетон и железобетон. – 1998. – № 6. – С. 16–19.
6. Пецольд, Т.М. Расчет усиления железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений (окончание) / Т.М. Пецольд, Д.Н. Лазовский // Бетон и железобетон. – 1999. – № 1. – С. 11–14.
7. Усиление железобетонных конструкций : П1-98 к СНиП 2.03.01-84* : утв. М-вом стр-ва и архитектуры Респ. Беларусь 07.04.98 № 140 : введ. 01.05.98. – Минск, 1998. – 189 с.
8. Онуфриев, Н.М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений / Н.М. Онуфриев. – М. : Стройиздат, 1965. – 342 с.
9. Мурашев, В.Н. Железобетонные конструкции / В.Н. Мурашев, Э.Е. Сигалов, В.Н. Байков. – М. : Госстройиздат, 1962. – 662 с.
10. Немировский, Я.М. Жесткость изгибаемых железобетонных элементов при кратковременном и длительном нагружении / Я.М. Немировский // Бетон и железобетон. – 1955. – № 5. – С. 172–176.
11. Немировский, Я.М. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с учетом работы растянутого бетона над трещиной и пересмотр на этой основе теории расчета деформаций и раскрытия трещин / Я.М. Немировский // Прочность и жесткость железобетонных конструкций : сб. науч. ст. / НИИЖБ ; под ред. А.А. Гвоздева. – М., 1968. – С. 47–54.
12. Байков, В.Н. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей / В.Н. Байков, С.В. Горбатов, З.А. Димитров // Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура. – 1977. – № 6. – С. 15–18.

13. Гроздов, В.Т. Определение предельных усилий в арматурном стержне при наличии в нем повреждений / В.Т. Гроздов // Изв. вузов. Сер. Стр.-во. – 1996. – № 8. – С. 126–128.
14. Жердеева, С.А. Моделирование влияния нелинейных свойств материалов на напряженное состояние железобетонных колонн при простом и косом внецентренном сжатии / С.А., Жердеева, М.М. Попова, А.А. Веселов // Труды Братского гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 2. – С. 97–101.
15. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020 : утв. М-вом архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь 16.09.20 № 56. – Минск, 2020. – 236 с.
16. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01-2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели / Д.Н. Лазовский [и др.] // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки (стр-во, машиностроение, геоэкология). Экон. науки. – 2021. – № 2 (125). – С. 7–12.

Поступила 06.12.2021

GENERAL METHOD BASED ON A NONLINEAR DEFORMATION MODEL FOR STRENGTH AND DEFORMATIONS ANALYSIS OF ECCENTRICALLY COMPRESSED CONCRETE COLUMNS, STRENGTHENED WITH A REINFORCED CONCRETE SECTION ENLARGEMENT

D. LAZOUSKI, D. GLUHAU, Y. LAZOUSKI

This article provides suggestions for improving the method for calculating obliquely compressed reinforced concrete columns reinforced under load with a closed reinforced concrete cage. It is based on a general nonlinear deformation model for calculating reinforced concrete elements under the combined action of bending moments and longitudinal forces, using a mathematical description of the deformation diagrams of concrete and reinforcement. The proposed analytical model allows one to take into account the effect of concrete shrinkage of a reinforced concrete reinforcement cage on the redistribution of internal forces in a reinforced element, and the proposed calculation method allows one to take into account the stress-strain state of a reinforced concrete column during its reinforcement, various physical, mechanical and rheological characteristics of materials of the reinforced and reinforcing parts of the structure.

Keywords: *reinforced concrete, reinforcement, eccentric compression, general nonlinear deformation model.*