

К ВОПРОСУ О ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИИ ВНУТРЕННИХ УСИЛИЙ В НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ

**Дорофеев В.С., д.т.н., проф., Карпюк В.М., д.т.н., проф.,
Крантовская Е.Н., к.т.н., доц., Тарасенко В.С., магистрант**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,
г.Одесса*

Осевые напряжения в рабочей арматуре над средней опорой в «эксплуатационной» стадии, определенные (табл.1) по результатам испытаний с помощью диаграммы состояния « σ - ε » арматуры класса А500С, можно выразить с помощью следующей зависимости:

$$\sigma_{s,оп}^{0,67F_u} = 25,14 + 3,2X_1 + 4,2X_4 - 0,89X_1^2 + 1,16X_1X_4 - 1,44X_1X_5, \text{ кН/см}^2, \\ \Sigma = 57,0; \sigma = 1,48; \nu = 5,89\%. \quad (1)$$

где X_1 – относительный пролет среза a/h_0 , X_2 – класс бетона В15...В35, X_3 – количество поперечной арматуры $\mu_{SW}=0,0018...0,0056$, X_4 – количество нижней продольной арматуры $\mu_{SH}=0,0101...0,0199$, X_5 – количество верхней продольной арматуры $\mu_{SB}=0,0101...0,0199$.

Наибольшее влияние на величину $\sigma_{s,оп}^{0,67F_u}$ оказывает процент нижнего продольного армирования μ_{SH} и относительный пролет среза. Оба эти фактора взаимодействуют между собой. Наличие квадратичного эффекта X_1 свидетельствует о том, что при дальнейшем уменьшении a/h_0 существенного увеличения $\sigma_{s,оп}^{0,67F_u}$ не произойдет. Так, $\sigma_{s,оп}^{0,67F_u}$ (см. рис. 1, а) возрастает по сравнению со средним значением 25,14 кН/см² при увеличении относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 3 - на 25,5%, увеличении нижнего продольного армирования μ_{SH} от 0,0101 до 0,0199 - на 33,4%.

Осевые растягивающие напряжения в рабочей верхней арматуре на опоре перед разрушением балки по результатам испытаний опытов выражаются следующей математической моделью:

$$\sigma_{s,оп}^{0,95F_u} = 47,92 + 2,24X_2 + 1,27X_4 - 2,24X_5 - 0,7X_2^2 - 1,55X_5^2, \text{ кН/см}^2, \\ \Sigma = 174,1; \sigma = 2,59; \nu = 5,4\%. \quad (2)$$

Таблица 1

Установленные с помощью диаграммы « σ - ϵ » значения нормальных напряжений в продольной растянутой $\bar{\sigma}_s$ и сжатой арматуре $\bar{\sigma}_s$ над средней опорой и под сосредоточенными грузами опытных балок

№ опыта	$\bar{\sigma}_s$, кН/см ² при «эксплуатационной» нагрузке (0,67F _л),		$\bar{\sigma}_s$, кН/см ² перед разрушением (0,95F _л)	
	над средней опорой, $\bar{\sigma}_{s,оп}$, кН/см ²	под сосредоточен- ным грузом, $\bar{\sigma}_{s,гр}$, кН/см ²	над средней опорой, $\bar{\sigma}_{s,оп}$, кН/см ²	под сосредоточе- нным грузом, $\bar{\sigma}_{s,гр}$, кН/см ²
1	2	3	4	5
1	32,1	14,9	46,2	40,5
2	23,9	1,8	43,4	3,2
3	16,2	1,1	47,8	2,3
4	24,5	10,2	44,9	40,5
5	25,1	1,4	46,4	2,5
6	29,6	14,0	42,9	39,9
7	22,2	9,7	48,2	40,5
8	15,6	1,4	45,2	2,7
9	24,7	1,8	52,7	2,3
10	34,6	10,0	46,3	29,8
11	21,1	13,9	45,4	51,5
12	21,1	2,0	36,6	3,0
13	19,2	1,6	45,4	3,2
14	20,7	14,4	40,2	51,5
15	34,8	9,7	52,7	29,1
16	22,4	1,1	45,6	2,7
17	27,7	11,4	48,1	38,0
18	21,1	1,4	47,5	3,0
19	27,0	4,5	47,9	10,8
20	23,6	4,3	47,3	10,8
21	25,3	4,5	48,1	11,0
22	24,9	4,4	48,1	11,0
23	29,5	4,9	47,9	9,5
24	20,1	3,7	47,5	11,9
25	25,3	5,6	45,0	11,0
26	25,1	3,3	48,5	8,5
27	25,5	4,4	47,5	10,5

Анализируя данную модель видно (рис. 3), что на величину нормальных напряжений в арматуре наибольшее влияние оказывают

класс бетона В и коэффициент верхнего продольного армирования μ_{SB} , затем – коэффициент нижнего продольного армирования μ_{SH} . Так, $\sigma_{s,оп}^{0,95F_u}$ возрастает по сравнению со средним значением 47,92 кН/см² при увеличении класса бетона от В15 до В35 - на 9,3%, увеличении нижнего продольного армирования μ_{SH} от 0,0101 до 0,0199 - на 5,3%, уменьшении количества верхней продольной арматуры μ_{SB} от 0,0199 до 0,0101 - на 9,3%.

$$\begin{aligned} \bar{Y}\sigma_{s,гр}^{0,67F_u} &= 4,32+5,26X_1+1,18X_5+2,13X_1^2+1,0X_1X_5, \text{ кН/см}^2, \\ \Sigma &= 2,05; \sigma = 0,28; \nu = 6,5\%; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{Y}\sigma_{s,гр}^{0,95F_u} &= 10,34+18,69X_1-2,64X_4+2,66X_5+10,34X_1^2+0,84X_3^2- \\ &-2,76X_1X_4+2,6X_1X_5, \text{ кН/см}^2, \\ \Sigma &= 16,92; \sigma = 0,81; \nu = 7,3\%. \end{aligned} \quad (4)$$

Рассматривая модели (3, 4), характеризующие нормальные напряжения в арматуре под сосредоточенным грузом в эксплуатационной стадии и перед разрушением, можно увидеть (рис. 2) наибольшее влияние относительного пролета среза и количества верхнего продольного армирования на выходные параметры $\sigma_{s,гр}^{0,67F_u}$ и $\sigma_{s,гр}^{0,95F_u}$. Нормальные напряжения в арматуре $\sigma_{s,гр}^{0,67F_u}$ увеличиваются по сравнению со своим средним значением 4,32 кН/см² при увеличении относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 3 на - 240%, увеличении количества верхней продольной арматуры μ_{SB} от 0,0101 до 0,0199 - на 54%.

$\sigma_{s,гр}^{0,67F_u}$ увеличиваются по отношению к среднему значению 10,34 кН/см²:

- с увеличением относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 3 - на 361%;

- с уменьшением количества нижней продольной арматуры μ_{SH} от 0,0199 до 0,0101 - на 51%;

- с увеличением количества верхней продольной арматуры μ_{SB} от 0,0101 до 0,0199 - на 51%.

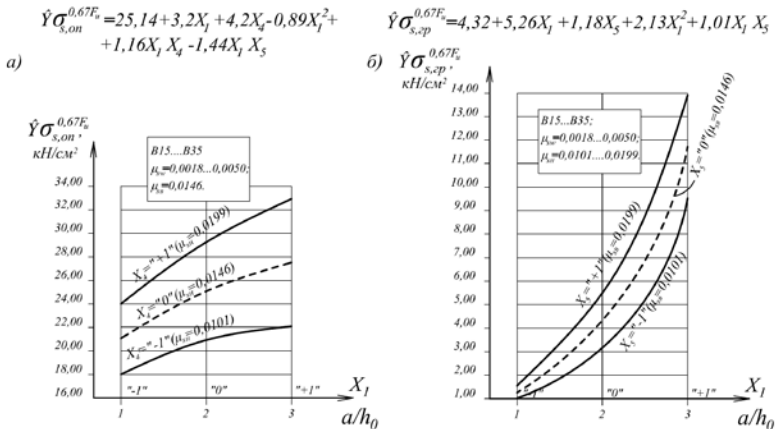


Рис. 1. Зависимость напряжений в продольной арматуре над средней опорой от пролета среза и количества нижней продольной арматуры (а) и под грузами от пролета среза и количества верхней арматуры (б) при «эксплуатационной» нагрузке ($F=0,67F_u$)

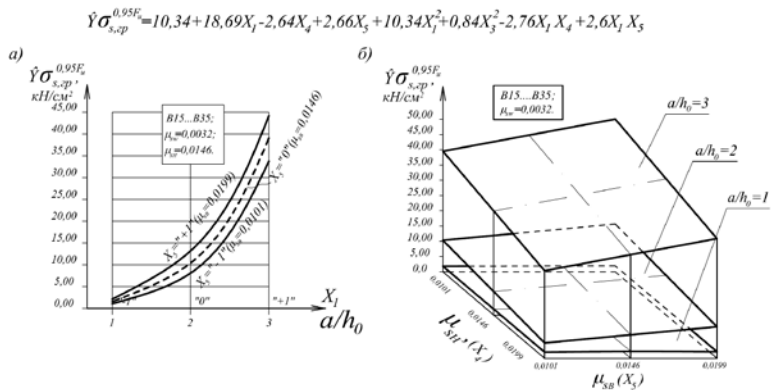


Рис. 2. Зависимость напряжений в нижней продольной арматуре под грузами от пролета среза и количества верхней продольной арматуры (а), от комплексного влияния исследуемых факторов (б) перед разрушением ($F=0,95F_u$)

$$\hat{Y}\sigma_{s,on}^{0,95F_u} = 47,92 + 2,24X_2 + 1,27X_4 - 2,24X_5 - 0,7X_2^2 - 1,55X_5^2$$

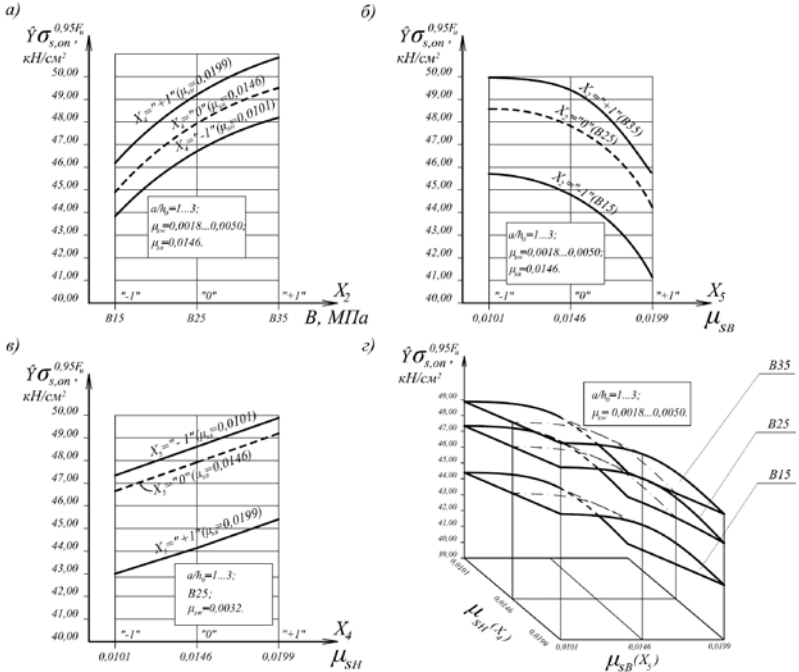


Рис. 3. Влияние класса бетона и количества нижнего продольного армирования (а), количества верхнего армирования и класса бетона (б), количества нижнего и верхнего продольного армирования (в), а также исследуемых факторов (г) на напряжения верхней арматуры над средней опорой перед разрушением ($F=0,95F_u$)

О влиянии исследуемых факторов на перераспределение усилий в нормальных сечениях неразрезной балки, т.е. на относительное приращение изгибающих моментов под сосредоточенными грузами в пролетах после образования условного пластического шарнира над средней опорой, можно судить по адекватной математической модели

$$\hat{Y}\Delta M_{np} / M_{np} = 0,35 + 0,023X_1 - 0,071X_2 + 0,152X_3 + 0,198X_4 - 0,101X_5 - 0,113X_1^2 - 0,047X_2^2 - 0,168X_3^2 + 0,202X_5^2 - 0,114X_1X_2 - 0,036X_2X_3 - 0,108X_3X_4 - 0,082X_3X_5 - 0,094X_4X_5,$$

$$\sum_{i=1}^{27} (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2 = 0,0083; \sigma = 0,018; \nu = 5,1\%, \quad (5)$$

которую путем замены кодированных переменных на натуральные значения можно представить в виде

$$\begin{aligned} \Delta M_{np} / M_{np} = & -0,578 + 0,760a/h_0 - 0,001B - 522,83\mu_{sw} + 53,48\mu_{sh} - 175,65\mu_{sb} - \\ & - 0,113(a/h_0)^2 - 65625,0\mu_{sw}^2 + 8413,16\mu_{sb}^2 - 0,011(a/h_0)B - 2,25B\mu_{sw} + \\ & + 13775,51\mu_{sw}\mu_{sh} - 10459,18\mu_{sw}\mu_{sb} - 3915,04\mu_{sh}\mu_{sb}, \end{aligned} \quad (6)$$

геометрическая интерпретация, которой показана на рис. 4.

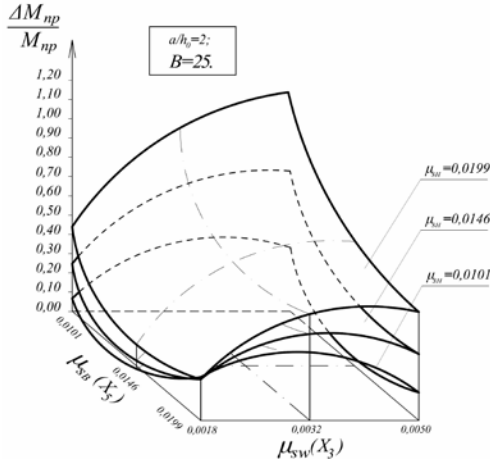


Рис. 4. Зависимость относительного приращения момента под сосредоточенным грузом после образования «пластического шарнира» над опорой

$\Delta M_{np} / M_{np}$ увеличивается (рис. 4) по сравнению со своим средним значениям 0,35 при увеличении относительного пролета среза a/h_0 от 1 до 3 - на 13%; при уменьшении класса бетона от В35 до В15 - на 40%, при увеличении поперечного армирования μ_{sw} от 0,0018 до 0,0050 - 86,9%, при увеличении нижнего продольного армирования μ_{sh} от 0,0101 до 0,0199 - на 113%; при уменьшении верхнего продольного армирования μ_{sb} от 0,0199 до 0,0101 - на 57,7%.

О «нагельном» эффекте продольной арматуры

Обработка данных о деформациях верхних и нижних волокон рабочей арматуры на рассматриваемых участках позволила определить величины продольной силы и изгибающего момента, возникающих в характерных сечениях этой арматуры.

Величина продольной силы, воспринимаемой рабочей арматурной в «эксплуатационной» стадии распределяется над средней опорой по трапециoidalному закону с ее увеличением в сторону действия максимальных моментов. Аналогичная картина наблюдается на участках под грузами. Перед разрушением балок напряжения в указанной арматуре в сечениях под грузами, в некоторых балках, близки или достигают предела текучести.

Максимальный изгибающий момент, воспринимаемый нижней рабочей арматурой, наблюдается в месте ее пересечения наклонной трещиной, т.е. над средней опоры.

Величину поперечной силы, воспринимаемой стержнями продольной арматуры (нагельного эффекта) определяли на основании дифференциального закона, связывающего изгибающий момент и поперечную силу.

По мере приближения от средней опоры к грузам напряжения в верхней продольной арматуре меняет знак от растяжения до сжатия и приближаются к расчетному сопротивлению.

В месте пересечения наклонной трещиной верхней сжатой арматуры в ней также проявляется нагельный эффект, величина которого не превышает 0,5%.

Незначительный по сравнению с опубликованными данными других авторов «нагельный» эффект в нижней и верхней продольной растянутой и сжатой арматуре объясняется особенностями напряженно-деформированного состояния приопорных участков исследуемых балок, а также эффективной работой поперечной арматуры на этих участках, воспринимающей на себя значительную часть поперечной силы.

В результате обработки экспериментальных данных получены математические модели (7, 8), характеризующие относительную величину нагельного эффекта Q_{sh}/Q_u и Q_{sb}/Q_u :

$$\begin{aligned} \hat{Y}Q_{sh}/Q_u = & 0,03 - 0,005X_1 - 0,003X_2 + 0,01X_4 - 0,004X_5 - 0,006X_1^2 + 0,008X_1X_2 + \\ & + 0,003X_1X_3 - 0,006X_1X_4 - 0,005X_3X_4, \\ \Sigma = & 0,00068; \sigma = 0,0016; \nu = 5,8\% \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \hat{Y}Q_{sb}/Q_u = & 0,018 - 0,002X_1 - 0,002X_2 + 0,007X_5 - 0,003X_1^2 - 0,002X_2X_4 - \\ & - 0,003X_2X_5 + 0,004X_1X_3 - 0,004X_3X_5 - 0,003X_1X_5, \\ \Sigma = & 0,0003; \sigma = 0,001; \nu = 5,8\% \end{aligned} \quad (8)$$

Анализируя модели 7, 8 можно увидеть существенную зависимость Q_{sh}/Q_u от процента нижнего продольного армирования μ_{sh} , а Q_{sb}/Q_u от процента верхнего продольного армирования μ_{sb} , затем, - относительного пролета среза a/h_0 и класса бетона В.

Q_{sh}/Q_u увеличивается по сравнению со средним значением 0,03 при уменьшении a/h_0 от 3 до 1 - на 33%, уменьшении класса бетона от В35 до В15 - на 20%, увеличении нижнего продольного армирования μ_{sh} от 0,0101 до 0,0199 - на 67%, уменьшении верхнего продольного армирования μ_{sb} от 0,0199 до 0,0101 - на 27%.

Q_{sb}/Q_u увеличивается по сравнению со средним значением 0,018 при уменьшении a/h_0 от 3 до 1 - на 22%, уменьшении класса бетона от В35 до В15 - на 22%, увеличении верхнего продольного армирования μ_{SH} от 0,0101 до 0,0199 - на 78%.

Геометрическая интерпретация влияния исследуемых факторов на Q_{SH}/Q_u и Q_{SB}/Q_u с помощью математических моделей (7, 8) представлена на рис. 5, 6.

$$\hat{Y}Q_{SH}/Q_u = 0,03 - 0,005 X_1 - 0,003 X_2 + 0,01 X_3 - 0,004 X_4 - 0,006 X_1^2 + 0,008 X_1 X_2 + 0,003 X_1 X_3 - 0,006 X_1 X_4 - 0,005 X_3 X_4$$

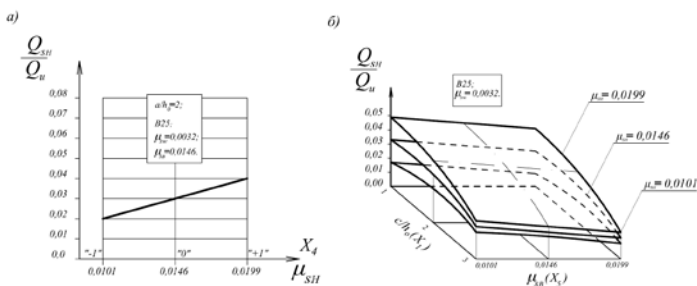


Рис.5. Зависимость нагельного эффекта нижней арматуры от количества нижней продольной арматуры (а) и комплексного влияния исследуемых факторов (б)

$$\hat{Y}Q_{SB}/Q_u = 0,018 - 0,002 X_1 - 0,002 X_2 + 0,007 X_3 - 0,003 X_4^2 - 0,002 X_2 X_4 - 0,003 X_2 X_5 + 0,004 X_1 X_3 - 0,004 X_3 X_5 - 0,003 X_1 X_5$$

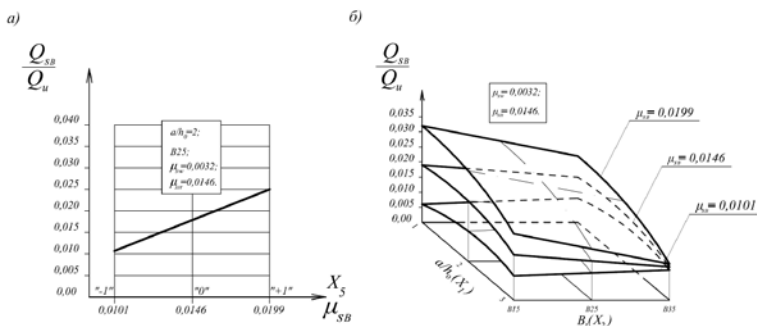


Рис. 6. Влияние количества верхней арматуры (а) и всех исследуемых факторов (б) на нагельный эффект верхней продольной арматуры

Выводы:

1. Напряженное состояние продольной арматуры в неразрезных балках во многом определяет их несущую способность. В качестве основного критерия их разрушения следует считать достижение нижней продольной арматуры предела текучести, т.е. образование второго условного шарнира.

2. Вторым и третьим критерием наступления предельного состояния в исследуемых элементах можно считать, соответственно, достижение в стержнях поперечной арматуры предела текучести или касательными напряжениями в бетоне относительно небольших приопорных участков ($a/h_0 \leq 2$) предельных значений $\tau_{xy} \approx 0,5R_{bt}$.

3. Зависимости (5) и (6) позволяют достоверно прогнозировать величину приращения изгибающих моментов в пролетных сечениях неразрезных железобетонных балок в зависимости от соотношения исследуемых факторов после образования условного пластического шарнира над средней опорой.

4. В непереармированных неразрезных железобетонных балках ($\mu_{SH} = \mu_{SB} \leq 0,02$) с достаточным количеством поперечной арматуры ($\mu_{SW} \geq 0,0018$) величина «нагельного» эффекта в продольной нижней и верхней арматуре не превышает 5% и им можно пренебречь в инженерных расчетах прочности их приопорных участков.

Summary

The results of experimental studies stress state of continuous reinforced concrete beams are represented. The quantitative and qualitative impact both individually and in concert with each other investigated factors on the stress state of the longitudinal reinforcement and the redistribution of bending moments of continuous reinforced concrete beams were studied.

Литература

1. Крылов С.М. Перераспределение усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях /С.М. Крылов.-М: Гостройиздат, 1964.-121с.

2. Масюк Г.Х. Експериментальні дослідження перерозподілу зусиль у двохпролітних нерозрізних залізобетонних балках при повторних навантаженнях /Г.Х. Масюк, В.С. Бабич// Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування: Збірник наукових праць.-Рівне: УДУВГП, 2002.- Вип. 4(17).-С.165-173.

3. Митрофанов В.П. Прочность при поперечном изгибе железобетонных элементов с полным использованием сопротивления поперечной и продольной арматуры / В.П. Митрофанов, П.П. Воскобойник // Актуальные проблемы водохозяйственного строительства. Тез. докл. респ. научно-тех. конф. – Ровно, 1980. – С 30-31

4. Митрофанов В.П. Методика и некоторые результаты экспериментального исследования работы продольной арматуры обычных железобетонных балок при поперечном изгибе / В.П. Митрофанов // Тезисы докладов БИСИ. – БССР, 1967. – С. 92-93.

5. Крантовская Е.Н. Прочность, трещиностойкость и деформативность приопорных участков неразрезных железобетонных балок диссертация на соискание учёной степени канд. техн. наук: 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / Крантовская Елена Николаевна. – Одесса, 2009. – 242с.