

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО АРМИРОВАНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ САМОНАПРЯЖЕНИЯ ПЛОСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Исследования железобетонных элементов [1], выполненных из напрягающего бетона, показали сложность определения самонапряжений, возникающих в результате его расширения. Это обусловлено тем, что к процессу расширения напрягающего бетона не применимы законы упругого деформирования и величина самонапряжения не может быть выражена через предельную деформацию свободного расширения. С другой стороны, на величину деформаций расширения твердеющего напрягающего бетона оказывает влияние значительное количество факторов конструктивно-технологического характера [2].

Учитывая указанные обстоятельства, на практике для определения величины самонапряжения в конструкции из напрягающего бетона используют функциональные (феноменологические) зависимости, полученные экспериментальным путем.

Согласно [3] величину самонапряжения предложено определять по мультипликативной зависимости вида:

$$\sigma_{CE} = f_{CE,d} \cdot \prod_{i=1}^n k_i \quad (1)$$

где: $f_{CE,d}$ – расчетное самонапряжение напрягающего бетона (Н/мм²), установленное в зависимости от его марки по самонапряжению; k_i – корректирующие коэффициенты, учитывающие отклонения самонапряжения конструкции от стандартных условий [4] в результате влияния конструктивно-технологических факторов.

Мультипликативная зависимость учитывает влияние следующих конструктивных факторов:

- величины упругого ограничения деформаций расширения, характеризующейся коэффициентом армирования и учитываемой коэффициентом k_{ρ} определяемым по формуле:

$$k_{\rho} = \sqrt{\frac{1,57 \cdot \rho_l}{0,0057 + \rho_l}} \quad (2)$$

где: ρ_l – коэффициент армирования сечения.

- эксцентриситета центра тяжести ограничивающей арматуры относительно центра тяжести бетонного сечения, учитываемого коэффициентом k_e , определяемым по формуле:

$$k_e = \left[1 - \gamma_l \left(\frac{e_s}{d} \right) \right] \quad (3)$$

где: e_s – эксцентриситет центра тяжести арматуры относительно центра тяжести бетонного сечения; d – расстояние от верхней грани до центра тяжести ограничивающей арматуры; γ_l – эмпирический коэффициент, принимаемый на основании исследований [5] равным $\gamma_l=1,257$.

- ориентации в пространстве ограничивающих связей, учитываемой коэффициентом k_s , принимаемым:
 - для одноосного ограничения $k_s=1$;
 - для двухосного ограничения $k_s=1,2$;
 - для трехосного ограничения $k_s=1,5$.

Для плоских элементов коэффициент $k_s=1,2$ принят постоянным на основании исследований [6], в которых было

установлено, что для одно- и двухосно с равными коэффициентами армирования вдоль главных осей армированных элементов зависимость между самонапряжениями и связанными деформациями может быть представлена в виде:

$$\sigma_{CE} = \frac{A}{(\epsilon_{CE,n} + B)^n} - C \quad (4)$$

где: σ_{CE} – самонапряжение в бетоне, принимаемое положительным; $\epsilon_{CE,n}$ – связанная деформация; A, B, C, n – эмпирические коэффициенты, принимаемые по данным работы [6].

На основании зависимости (4) нелинейные физические зависимости для плоского напряженного состояния могут быть представлены в виде, предложенном в [6]:

$$\begin{cases} \epsilon_{CE,x} = \left(\frac{A}{\sigma_{CE,x} + C} \right)^{1/n} - \lambda \left(\frac{A}{\sigma_{CE,y} + C} \right)^{1/n} - B(1 - \lambda) \\ \epsilon_{CE,y} = \left(\frac{A}{\sigma_{CE,y} + C} \right)^{1/n} - \lambda \left(\frac{A}{\sigma_{CE,x} + C} \right)^{1/n} - B(1 - \lambda) \end{cases} \quad (5)$$

где: λ – коэффициент поперечного расширения.

Для условий равного двухосного ограничения деформаций зависимость для оценки коэффициента поперечного расширения, полученная путем совместного решения уравнений (4) и (5), сводится к одному уравнению:

$$\lambda = 1 - \frac{\epsilon_{CE,n}}{\left[\frac{A(\epsilon_{CE,n} - B_2)^{n_2}}{A_2 - (C_2 - C)(\epsilon_{CE,n} + B_2)^n} \right]^{1/n} - B} \quad (6)$$

где: A_2, B_2, C_2, n_2 – эмпирические коэффициенты.

Как следует из заключения, приведенного в работе [6], выражение (6) достаточно громоздко и усложняет решение конкретных задач. Анализируя представленное выражение с помощью компьютерного моделирования, авторы [6] утверждают, что коэффициент поперечного расширения в диапазоне самонапряжений, возникающих в материале, на практике изменяется незначительно и это изменение не может существенно сказаться на окончательных результатах расчетов. Исходя из этого, в работе [6] сделан вывод, что при практических расчетах коэффициент λ целесообразно принимать постоянным и равным $\lambda = 0,46 \pm 0,48$.

Принимая во внимание названное обстоятельство, нормативный документ [7] предлагает производить расчет самонапряжения при наличии плоского ограничения деформаций расширения, учитывая влияние армирования «дополнительного» направления по отношению к «основному» путем введения корректирующего коэффициента k_s по формулам:

$$\sigma_{CE,x} = k_s f_{CE,d} k_{\rho x} \quad (7)$$

$$\sigma_{CE,y} = k_s f_{CE,d} k_{\rho y} \quad (8)$$

где: $k_s=1,2$.

Марчук Виталий Алексеевич. Ассистент каф. начертательной геометрии и черчения Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Таблица 1 – Номенклатура опытных образцов.

№ пп	Серия	Образец	Количество арматуры	
			поперечной, ρ_{lx} , %	продольной, ρ_{ly} , %
1	2	3	4	5
1	I	I П-1	0,560	0,560
		I П-2	1,120	0,560
		I П-3	1,493	0,560
		I П-4	2,240	0,560
		I П-5	2,981	0,560
2	II	II П-1	0,560	1,120
		II П-2	1,120	1,120
		II П-3	1,493	1,120
		II П-4	2,240	1,120
		II П-5	2,981	1,120
3	III	III П-1	0,560	1,493
		III П-2	1,120	1,493
		III П-3	1,493	1,493
		III П-4	2,240	1,493
		III П-5	2,981	1,493
4	IV	IV П-1	0,560	2,240
		IV П-2	1,120	2,240
		IV П-3	1,493	2,240
		IV П-4	2,240	2,240
		IV П-5	2,981	2,240
5	V	V П-1	0,560	2,981
		V П-2	1,120	2,981
		V П-3	1,493	2,981
		V П-4	2,240	2,981
		V П-5	2,987	2,981
6	VI	VI П-1	0,560	0,560
		VI П-2	1,120	1,120
		VI П-3	1,493	1,493
		VI П-4	2,240	2,240
		VI П-5	2,987	2,981

Однако в этом случае связанная деформация арматуры, а соответственно и бетона, плоско напряженного элемента должна возрасти на 20% по отношению к элементу, имеющему только линейное ограничение, независимо от количества и положения арматуры, расположенной в «дополнительном» направлении. Следует отметить, что для бетонов низкой и средней энергоактивности в опытах [8, 9, 6] не выявлено существенного влияния ограничения в «дополнительном» направлении, что дало основание принять в [7] при расчете таких конструкций $k_s = 1$.

В связи с этим более обоснованным является определение величины усилия обжатия по величине реакции в ограничивающей связи с учетом повышенного значения расчетного самонапряжения по [7] и переменного значения коэффициента поперечного расширения. В этом случае деформацию на уровне центра тяжести ограничивающей арматуры следует определять:

$$\epsilon_{s,CE,x} = 1.2 f_{CE,d} \left[\frac{k_{\rho x} \cdot k_{ex}}{\rho_{lx} \cdot E_s} - \lambda \frac{k_{\rho y} \cdot k_{ey}}{\rho_{ly} \cdot E_s} \right], \quad (9)$$

$$\epsilon_{s,CE,y} = 1.2 f_{CE,d} \left[\frac{k_{\rho y} \cdot k_{ey}}{\rho_{ly} \cdot E_s} - \lambda \frac{k_{\rho x} \cdot k_{ex}}{\rho_{lx} \cdot E_s} \right], \quad (10)$$

а возникающее в ней усилие, равное усилию обжатия:

$$N_{s,CE,x} = N_{CE,x} = 1.2 f_{CE,d} \left[\frac{k_{\rho x} \cdot k_{ex}}{\rho_{lx}} - \lambda \frac{k_{\rho y} \cdot k_{ey}}{\rho_{ly}} \right] A_{s,x}, \quad (11)$$

$$N_{s,CE,y} = N_{CE,y} = 1.2 f_{CE,d} \left[\frac{k_{\rho y} \cdot k_{ey}}{\rho_{ly} \cdot E_s} - \lambda \frac{k_{\rho x} \cdot k_{ex}}{\rho_{lx} \cdot E_s} \right] A_{s,y}. \quad (12)$$

При центральном положении ограничивающей связи и равных количествах арматуры во взаимно перпендикулярных направлениях ($\rho_{lx} = \rho_{ly} = \rho$; $k_{lx} = k_{ly} = 1$; $k_{\rho x} = k_{\rho y} = k_{\rho}$) усилия обжатия определяются:

$$N_{s,CE,x} = N_{s,CE,y} = 1.2 f_{CE,d} (1 - \lambda) \frac{k_{\rho}}{\rho_l} A_{s(x,y)} \quad (13)$$

Исходя из изложенных факторов и результатов исследований, приведенных в [10], следует, очевидно, поставить под сомнение справедливость допущения, принятого в работе [6] о постоянстве коэффициента поперечного расширения λ ($\lambda = 0.46 \div 0.48$). Красноречивое подтверждение этому находится при анализе экспериментальных данных, полученных в работах [9], где исследовали развитие самонапряжения в условиях равного двухосного ограничения деформаций расширения. Для исследования использовали железобетонные диски диаметром 16 см и толщиной 4 см. Диски армировали спиральными каркасами, которые обеспечивали равное в двух направлениях упругое ограничение, соответствующее коэффициентам армирования $\rho = 0.13; 0.3; 0.5; 0.8; 1.0; 2.0; 3.0$ %. Для бетонирования использовали песчаный бетон на напрягающем цементе с характеристиками свободного расширения $\epsilon_{CE,w} = 0.2; 0.9; 3.2$ %.

Таблица 2 – Деформации опытных образцов на стадии расширения.

Армирование		Относительные деформации					
$\rho_x, \%$	$\rho_y, \%$	по оси X			по оси Y		
		ϵ_x	$\epsilon_{x,0}$	$k_{sx} = \epsilon_x / \epsilon_{x,0}$	ϵ_y	$\epsilon_{y,0}$	$k_{sy} = \epsilon_y / \epsilon_{y,0}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0,56	0,56	65,0	100,0	0,65	68,5	100,0	0,685
1,12	0,56	46,5	57,8	0,804	65,0	100,0	0,65
1,12	0,56	80,0	176,2	0,454	155,0	304,8	0,509
1,493	0,56	43,5	45,3	0,96	65,0	100,0	0,65
1,493	0,56	88,5	138,2	0,64	173,5	304,8	0,569
2,24	0,56	31,5	31,7	0,994	70,0	100,0	0,7
2,981	0,56	36,5	24,5	1,49	58,5	100,0	0,585
0,56	1,12	140,0	120,5	1,162	78,5	69,7	1,126
1,12	1,12	65,0	69,7	0,933	63,5	69,7	0,911
1,12	1,12	125,0	185,3	0,675	150,0	185,3	0,809
1,493	1,12	56,5	54,6	1,035	60,0	69,7	0,861
1,493	1,12	165,0	145,3	1,136	133,5	185,3	0,72
2,24	1,12	58,5	38,2	1,531	96,5	69,7	1,385
2,24	1,12	110,0	101,7	1,082	167,5	185,3	0,904
2,981	1,12	75,0	29,5	2,542	40,0	69,7	0,574
2,981	1,12	110,0	78,4	1,403	180,0	185,3	0,971
0,56	1,493	135,0	126,0	1,071	46,5	57,1	0,814
1,12	1,493	95,0	72,9	1,303	75,0	57,1	1,313
1,493	1,493	58,5	57,1	1,025	60,0	57,1	1,051
1,493	1,493	60,0	152,4	0,394	65,0	152,4	0,427
1,493	1,493	110,0	142,8	0,77	70,0	142,8	0,49
2,24	1,493	62,5	40,0	1,563	107,5	57,1	1,889
2,24	1,493	113,5	99,9	1,136	171,5	142,8	1,201
2,981	1,493	82,5	30,8	2,679	76,5	57,1	1,34
2,981	1,493	111,5	77,04	1,447	133,5	142,8	0,935
1,12	2,981	186,5	179,0	1,042	65,0	75,7	0,859
1,493	2,981	163,5	171,4	0,954	83,5	92,4	0,904
1,493	2,981	170,0	140,3	1,212	58,5	75,7	0,773
2,24	2,981	113,5	98,2	1,156	111,5	75,7	1,473
2,323	2,981	86,5	116,0	0,746	11,5	92,4	0,124
2,987	2,981	68,5	75,5	0,907	88,5	75,7	1,169
2,987	2,981	60,0	82,1	0,731	37,5	82,2	0,456

Для условий равного центрального расположения армирования в двух направлениях, пользуясь формулой (13) устанавливали значение коэффициента поперечных деформаций λ .

При обработке полученных данных методами математической статистики получена функциональная зависимость, описывающая значение коэффициента поперечного расширения в зависимости от коэффициента армирования сечения (рис. 1) в виде:

$$\lambda = a \cdot \rho + b \quad (14)$$

где: a, b – эмпирические коэффициенты, которые могут быть приняты равными: $a=0.3345$; $b=0.494$; ρ – коэффициент армирования, выраженные в %.

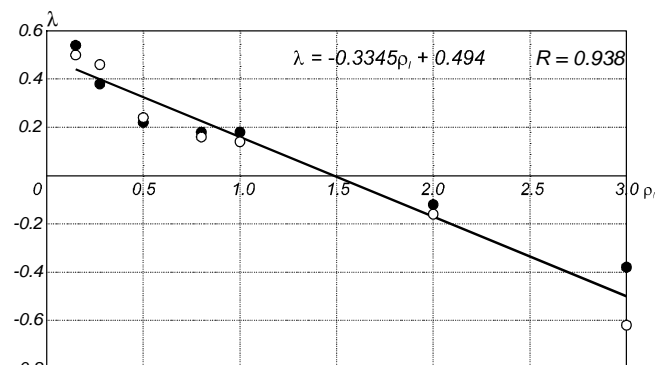


Рисунок 1 – Опытная зависимость коэффициента поперечного расширения от коэффициента армирования сечения.

Как видно из рис. 1, коэффициент поперечной деформации λ не является постоянной величиной, а зависит от величины коэффициента армирования ρ_l и с увеличением его λ уменьшается. Так же следует отметить, что представленная на рис. 1 зависимость $\lambda=f(\rho_l)$ справедлива для случая двухосно армированных элементов с равным количеством арматуры по двум главным направлениям ($\rho_{lx}=\rho_{ly}$). Справедливость этой зависимости для случая разного количества арматуры по двум главным направлениям ($\rho_{lx}\neq\rho_{ly}$) не установлена.

Следовательно, не вполне правомерным является и использование постоянного коэффициента k_s для учета влияния на величину самонапряжения ориентации в пространстве ограничивающих связей, так как при постоянном армировании в продольном направлении $\rho_{ly}=\text{const}$ и армировании в поперечном направлении $\rho_{lx}\rightarrow 0$ ограничение деформаций расширения напрягающего бетона из двухосного стремится стать одноосным, а коэффициент k_s оставаясь постоянным и равным 1,2 никак этого не учитывает.

На основании вышесказанного можно сделать следующий вывод: самонапряжение конструкций при плоском ограничении деформаций расширения достаточно хорошо изучено при равной степени ограничения деформаций в двух взаимно перпендикулярных направлениях, и существующая методика расчёта учитывает в большей мере именно такой расчётный случай. Методика расчета плоских железобетонных конструкций из напрягающего бетона при разных коэффициентах армирования по двум главным осям разработана недостаточно полно и не учитывает изменения армирования в поперечном направлении.

С целью изучения процесса самонапряжения плоских железобетонных конструкций, имеющих разное количество арматуры по двум взаимно перпендикулярным направлениям ($\rho_{lx} \neq \rho_{ly}$), были проведены испытания на стадии самонапряжения опытных образцов, представляющих собой модели таких конструкций. Конструкция опытного образца представлена на рис. 2.

Размеры образцов 450×450 мм в плане и толщина 30 мм установлены, исходя из возможности изготовления в лабораторных условиях, а так же обеспечения отношения толщины к линейному размеру в плане 1/15, что позволяет считать опытные образцы плоскими элементами.

Армировались опытные образцы отдельными арматурными стержнями Ø4 мм и Ø8 мм, которые крепили в бортах опалубки.

Для изготовления опытных образцов плит использовали бетонную смесь состава 1:1 (НЦ: песок) на песке с модулем крупности $M_{кр}=2,7$. Водоцементное отношение принимали равным В/Ц=0,32. Бетонную смесь приготавливали вручную. Уплотнение производили на лабораторной виброплощадке.

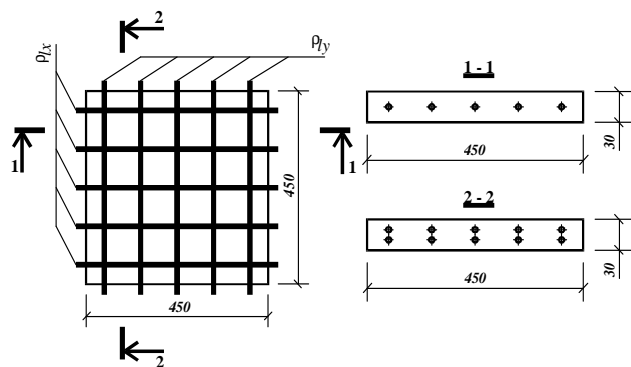


Рисунок 2 – Конструкция опытного образца.

Номенклатура опытных образцов представлена в табл. 1.

Одновременно с каждой серией изготавливали по стандартной методике [7] контрольные образцы в количестве: 3 кольца для контроля величины самонапряжения, 3 призмы для контроля величины свободного расширения и 9 призм для контроля прочности. Деформации опытных образцов по двум взаимно перпендикулярным направлениям измеряли с помощью специального переносного деформометра с индикатором ИЧ-10, имеющим цену деления 0,01 мм, для чего на бетон образца с помощью эпоксидного клея наклеивали специальные металлические репера. База измерений в 200 мм назначена исходя из условия, чтобы расстояние от репера до края плиты было не менее 15 наибольших диаметров арматуры с целью исключения из базы измерений концевых участков, на которых возможно проскальзывание арматуры при расширении напрягающего бетона.

По результатам измерений получены данные, представленные в табл. 2.

С помощью методов математической статистики для коэффициента k_s получена функциональная зависимость:

$$k_s = 0,98 + 0,16 \cdot \rho_{ly} - 0,12 \cdot \rho_{lx} \quad (15)$$

где: ρ_{lx} и ρ_{ly} – коэффициенты армирования по осям X и Y соответственно.

При этом должны соблюдаться следующие условия:

$$\begin{aligned} \rho_{lx} &\leq \rho_{ly} \\ 0,005 &\leq \rho_{lx} \leq 0,03 \\ 0,005 &\leq \rho_{ly} \leq 0,03 \end{aligned} \quad (16)$$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющие и напрягающие цементы и самонапряженные конструкции.– М.: Стройиздат, 1974.– 389 с.
2. Тур В.В. Определение величины самонапряжений в конструкциях из напрягающего бетона // Напрягающие цементы, бетоны и самонапряженные конструкции: Сб. тр./ Под. ред. В.В. Тура.– Брест, БГТУ, 2001 – с. 35-48.
3. Пособие по проектированию самонапряженных железобетонных конструкций (к СНиП 2.03.01–84)/ В.В. Михайлов, С.Л. Литвер, Л.И. Будагянц и др.– Москва: ЦНТП, 1986.– 37 с.
4. ТУ РБ02071613.183 - 99. Цемент напрягающий.– Технические условия (опытная партия). – Брест:1999. - 14 с.
5. Тур В.В., Басов В.С. К вопросу о влиянии эксцентриситета приложения ограничивающей связи на процессы развития самонапряжения// Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: Материалы научн. конф. Брест, 1997 г./ Брестский политехн. ин-т.– Брест, 1997.– С. 119–130.
6. Михайлов В.В., Гершвальд В.С. Плоские самонапряженные конструкции// Исследование и применение напрягающего бетона и самонапряженных конструкций/ Сб. тр. под ред. В.В.Михайлова и С.Л.Литвера.– М.: Стройиздат, 1984, С. 62–67.
7. Пособие по проектированию самонапряженных железобетонных конструкций (к СНиП 2.03.01–84)/ В.В. Михайлов, С.Л. Литвер, Л.И. Будагянц и др.– Москва: ЦНТП, 1986.– 37 с.
8. Александровский С.В., Бакума П.Ф. Предварительно напряженный и самонапряженный бетон в США. – М.: Стройиздат, 1974.– 320 с.
9. Литвер С.Л., Петухов А.И. Самонапряжение при двухосном ограничении деформаций расширения// Исследования и применение напрягающего бетона и самонапряженных конструкций: Сб. тр./ Под ред. В.В. Михайлова.– Москва, 1984.– С. 67–78.
10. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона./ Изд. БПИ, Брест: 1998. – 243 с.