

А.А. КОНДРАТЧИК, В.А. МАРЧУК, О.Г. САННИКОВА

Брестский государственный технический университет

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ С КОМБИНИРОВАННЫМ ПРЕДНАПРЯЖЕНИЕМ АРМАТУРЫ

The test results of stress change in combined prestressed reinforcement and the influence of reinforcement with initial stresses on the development of self-stressing and the formation of stress state at section of self-stressed concrete element are presented.

ВВЕДЕНИЕ

Использование напрягающего бетона при изготовлении железобетонных конструкций позволяет получить внутренние напряжения (самонапряжение) в материале, благодаря растяжению арматуры, независимо от ее расположения в сечении, деформируемой (преднапрягаемой) при расширении бетона [1]. Такой способ предварительного напряжения арматуры называют физико-химическим [2]. Получаемые напряжения самонапряжения улучшают работу железобетонных конструкций, снижая или компенсируя усадку бетона, создавая выгодное внутреннее напряженное состояние, учитываемое при расчете трещиностойкости, жесткости и прочности конструкций [3]. Очевидно, что такое напряженное состояние окажет влияние и на работу приопорной зоны изгибаемых элементов, повысив ее трещиностойкость и изменяя характер разрушения [5, 6]. На практике хорошо освоено предварительное напряжение продольной арматуры, что дает возможность получить значительное по величине усилие обжатия бетона в направлении одной (продольной) оси элемента. Использование при изготовлении таких элементов напрягающего бетона позволит создать предварительное напряжение в поперечной арматуре и дополнительно продеформировать арматуру, уже имеющую предварительное напряжение, созданное иным способом (назовем его условно механическим способом). Создание такими способами (механическим и физико-химическим) предварительного напряжения в арматуре получило название комбинированного способа [4].

Для уверенного проектирования железобетонных конструкций из напрягающего бетона с арматурой, предварительно напряженной комбинированным способом, необходимо знать характер формирования и изменения напряжений

в арматуре. В настоящей статье приводятся данные исследований изменения предварительного напряжения в арматуре, создаваемого комбинированным способом, выполненные в Брестском государственном техническом университете в 2008 году.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходные материалы. Напрягающий цемент изготавливался в лабораторных условиях в шаровой мельнице при совместном помоле следующих компонентов (дано процентное соотношение): 74:14:12 - ПЦ М500 Д0 Волковысского цементного завода: глиноземистый цемент М400 Пашийского завода : гипс природный Новомосковского месторождения.

Бетонная смесь при изготовлении напрягающего бетона (из расчета на 1 м^3) имела следующий состав: 500 кг : 750 кг : 1150 кг : 215 л - напрягающий цемент : песок : щебень : вода.

Арматура, напрягаемая комбинированным способом, - $\varnothing 14$ S800 по ГОСТ 5781 (относительное удлинение - 6%, временное сопротивление - 1124,2 МПа, условный предел упругости - 835,8 МПа, условный предел текучести - 982,1 МПа, начальный модуль упругости - 209876,5 МПа); сетки косвенного армирования из арматуры $\varnothing 5$ S500 по СТБ 1704. Характеристики материалов контролировались по контрольным образцам и методикам следующих нормативно-технических документов: СТБ 1335-2002 (напрягающий цемент), ТУ 67-938-87 (напрягающий бетон), ГОСТ 12004-81 (испытание арматуры).

Опытные образцы размером 120x120x1500 мм армировались одним стержнем ($\varnothing 14$ S800), расположенным в центре сечения, и отличались шагом (S, мм) сеток косвенного армирования и способом предварительного напряжения арматуры:

- марка образца СН - $\sigma_{0,\max} = 0$, арматура натягивалась физико-химическим способом при расширении напрягающего бетона, сетки косвенного армирования отсутствуют (базовые образцы);
- марка образца КНК0 - $\sigma_{0,\max} / f_{p0,2k} = 0,518$, арматура дополнительно деформировалась физико-химическим способом, сетки косвенного армирования отсутствуют;
- марка образца КНК40 - $\sigma_{0,\max} / f_{p0,2k} = 0,505$, арматура дополнительно деформировалась физико-химическим способом, сетки косвенного армирования ставились с шагом $s = 40$ мм на длине 160 мм;
- марка образца КНК80 - $\sigma_{0,\max} / f_{p0,2k} = 0,524$, арматура дополнительно деформировалась физико-химическим способом, сетки косвенного армирования ставились с шагом $s = 80$ мм на длине 160 мм.

Предварительное напряжение арматуры осуществляли механическим способом на упоры силовой рамы гидравлическим домкратом фирмы Dyckerhoff & Widmann, модель 74-113.00 (рисунки 1, 2).

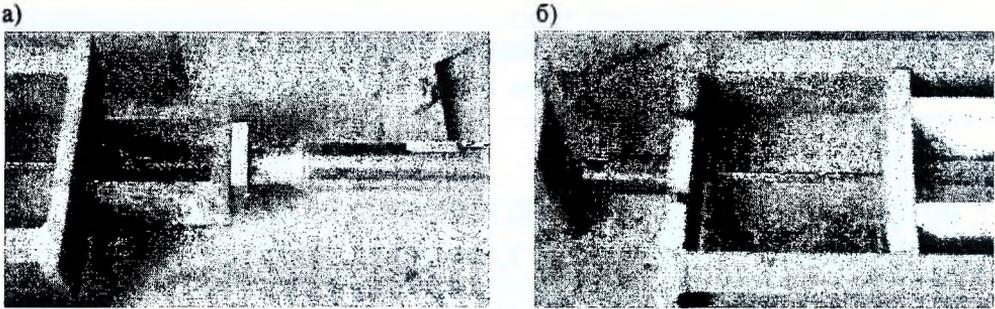


Рис. 1. Натяжение арматуры гидродомкратом (а) и способ закрепления на торцах силовой рамы (б)

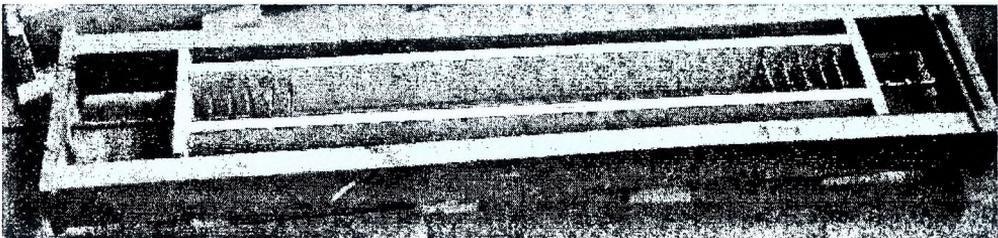


Рис. 2. Общий вид опытного образца марки КНК40 перед укладкой напрягающего бетона

В течение выдержки опытных образцов во влажных и воздушно-сухих условиях производили контроль деформаций арматуры и бетона переносными миссурами по реперам (во влажных условиях - рисунок 3а, б) и тензодатчиками (при передаче усилия натяжения арматуры с упоров на бетон - рисунок 3в).

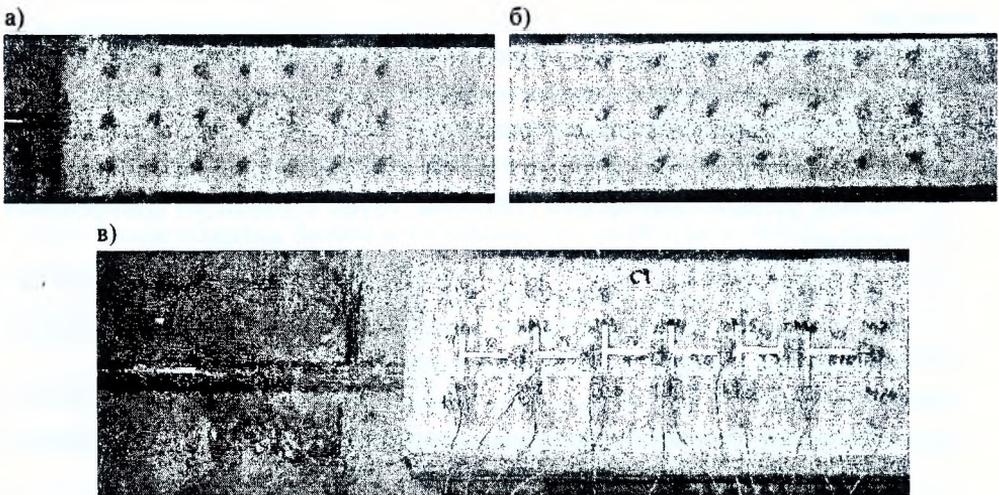


Рис. 3. Схемы расположения точек контроля деформаций бетона и арматуры: а) по реперам на торцевых участках образцов; б) по реперам в средней части образцов; в) по тензодатчикам, наклеенным на арматуру и бетон на торцевых участках

Перед испытанием производили передачу усилия натяжения с упоров силовой рамы на бетон. Испытание опытных балок было выполнено статической нагрузкой сосредоточенной силой, приложенной в середине пролета ($l_{eff} = 1020$ мм).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно теоретических исследований, представленных в [4], было показано, что величина предварительного напряжения на свободных участках арматуры между торцами балок и наружными гранями упоров на стадии расширения напрягающего бетона будет снижаться. Величина этого снижения может быть определена по зависимости (рис. 4):

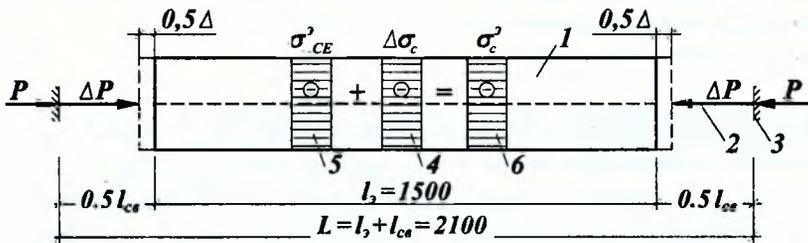


Рис. 4. Схема действующих усилий при предварительном напряжении арматуры комбинированным способом: 1 - элемент из бетона на НЛ; 2 - арматура, предварительно напряженная комбинированным способом; 3 - упоры - торцы силовой рамы; 4 - эпюра напряжений при действии ΔP ; 5 - эпюра напряжений при развитии самоупрочнения; 6 - общая эпюра напряжений в элементе

$$\Delta\sigma_{s,CE}^{ce} = \varepsilon_{s,CE}^{ce} \cdot E_s = \frac{\Delta \cdot E_s}{l_{ce}} = \frac{\varepsilon_{s,CE}^3 \cdot l_3}{l_{ce}} \cdot E_s = \varepsilon_{s,CE}^3 \cdot E_s \cdot k_n \quad (1)$$

где:

$\varepsilon_{s,CE}^{ce}$, $\varepsilon_{s,CE}^3$ - деформация арматуры физико-механическим способом на свободных участках и внутри элемента соответственно;

l_{ce} , l_3 - длина арматуры на свободных участках и внутри элемента соответственно.

$$k_n = \frac{l_3}{l_{ce}} = \frac{1500}{600} = 2,5$$

$$\varepsilon_{s,CE}^3 = \frac{\sigma_{CE} \cdot k_\rho \cdot k_s \cdot k_e}{\rho_l \cdot E_s} \quad (2)$$

при $k_s = 1,0$; $k_e = 1,0$; $\rho_l = 0,0107$; $E_s = 2,098 \cdot 10^5$ МПа

σ_{CE} - величина самоупрочнения на момент передачи усилия натяжения арматуры с упоров на бетон, определенная по контрольным образцам;

$$k_p = \sqrt{\frac{1,57 \rho_{lx}}{0,0057 + \rho_{lx}}} = \sqrt{\frac{1,57 \cdot 0,0107}{0,0057 + 0,0107}} = 1,01 \quad (3)$$

Результаты исследований приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Определение напряжений обжатия бетона арматурой, преднапряженной комбинированным способом

Марка образца	Нагрузка трещинообразования, кН	Прочность бетона, МПа				Напряжение обжатия $\sigma_{CE,k}$, МПа
		$f_{CE,m}$	f_{ct}	f_{ctk}	f_{ctk}^{on}	
КНК0	11,77	56,5	48,5	2,79	6,07	3,28
КНК40	12,38	41,8	33,8	2,19	6,39	4,20
КНК80	13,06	56,5	48,5	2,79	6,74	3,95
СН	8,24	41,8	33,8	2,19	4,25	2,06

1. Значение $f_{CE,m}$ приведено с учетом масштабного коэффициента $\alpha = 0,95$
 2. Напряжение обжатия определено $\sigma_{CE,k} = f_{ctk}^{on} - f_{ctk}$, МПа

Величина предварительного напряжения в арматуре, созданная механическим способом и зафиксированная после закрепления на торцах силовой рамы, принята 100%. На стадии расширения напрягающего бетона величина усилия натяжения арматуры на свободных участках между балкой и упорами снизилась в среднем на 74,5%, что позволило получить более мягкий режим обжатия бетона при передаче усилия натяжения арматуры с упоров на бетон. Это свидетельствует о развитии деформаций расширения напрягающего бетона опытных образцов (табл. 2).

Таблица 2. Изменение величины напряжения в арматуре, преднапрягаемой комбинированным способом

№ п/п	Величина предварительного напряжения арматуры, МПа	Марка образца			
		СН ¹	КНК0	КНК40	КНК80
1	На стадии изготовления:				
1.1	– созданное механическим способом, $\sigma_{0,max}$	–	<u>508,25</u> (100%)	<u>496,43</u> (100%)	<u>514,15</u> (100%)
1.2	– оставшееся на свободных участках, $\sigma_{0,1}$	–	<u>100,29</u> (19,7%)	<u>156,7</u> (31,5%)	<u>129,05</u> (25,1%)
1.3	– $\Delta \sigma_{01} = \sigma_{0,max} - \sigma_{0,1}$	–	<u>407,96</u> (–80,3%)	<u>339,86</u> (–68,5%)	<u>129,05</u> (–74,9%)
2	На стадии испытания ² :				
2.1	– на момент испытания, $\sigma_{0,2}$	<u>192,75</u> (100%)	<u>306,90</u> (60,4%)	<u>392,98</u> (79,2%)	<u>369,59</u> (71,9%)
2.2	– $\Delta \sigma_{02} = \sigma_{0,max} - \sigma_{0,2}$	<u>192,75</u> (0%)	<u>201,35</u> (–39,6%)	<u>103,45</u> (–20,8%)	<u>144,56</u> (–28,1%)

1. Арматура предварительно напряжена физико-химическим способом, а образец испытан в возрасте 30 сут.
 2. Образцы испытаны в возрасте - 30 сут. (марки СН), 32 сут. (марки КНК40), 110 сут (марки КНК80), 113 сут. (марки КНК0)

При испытании образцов на изгиб фиксировали усилие, при котором появлялась трещина, а по нему определяли величину общего сопротивления напрягающего бетона разрыву (f_{ctk}^{on}), которое включает прочность бетона на растяжение (f_{ctk}) и напряжение обжатия сечения ($\sigma_{CE,k}$) арматурой, предварительно напряженной комбинированным способом (табл. 1). По величине напряжения обжатия бетона $\sigma_{CE,k}$ определяли значение преднапряжения в арматуре на момент испытания. Обращает на себя внимание тот факт, что наличие сеток косвенного армирования (особенно с шагом 2,85ø – 40 мм) позволило получить большую величину напряжения в арматуре (+18,8%) по сравнению с образцом без сеток косвенного армирования. Увеличение шага сеток косвенного армирования в два раза привело к снижению величины напряжения в арматуре на 7,3%.

ВЫВОДЫ

1. Применение комбинированного способа для предварительного напряжения арматуры позволяет получить более мягкий режим передачи усилия натяжения арматуры с упоров на бетон.
2. Сетки косвенного армирования, установленные на торцевых участках, способствуют увеличению значения предварительно напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Михайлов В.В., Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные конструкции (В.В. Михайлов, С.Л. Литвер), Стройиздат, Москва 1974, 312 с.
- [2] Тур В.В., Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжений конструкций при применении напрягающего бетона, Изд-во БПИ, Брест 1998, 246 с.
- [3] Кондратчик А.А., Экспериментально-теоретические основы расчета конструкций из напрягающего бетона при совместном действии изгибающего момента, продольных и поперечных сил, Издательство БрГТУ, Брест, 172 с.
- [4] Кондратчик А.А., Железобетонные конструкции с арматурой, предварительно напряженной комбинированным способом, Строительная наука и техника 2008, 5, 44-53.
- [5] Тур В.В., Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил (В.В. Тур, А.А. Кондратчик), Изд-во БГТУ, Брест 2000, 400 с.
- [6] Кондратчик А.А., Повышение эффективности использования арматуры приопорной зоны железобетонных балочных элементов (А.А. Кондратчик, О.Г. Гарах), Вестник ПГУ. Прикладные науки, Строительство 2007, 6, 60-64.