

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.044:624.012.4

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВЯЗАННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА СТАДИИ РАСШИРЕНИЯ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА В УСЛОВИЯХ ДВУХОСНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ

д-р техн. наук, проф. В.В. ТУР; О.Г. САННИКОВА
(Брестский государственный технический университет)

Рассмотрены методы определения связанных деформаций и самонапряжений на стадии расширения напрягающего бетона в условиях двухосного ограничения. Представлена деформационная модель для определения связанных деформаций на стадии расширения напрягающего бетона при двухосном ограничении. Приведены результаты экспериментальных исследований плитных образцов. Дан сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений связанных деформаций расширения.

Ключевые слова: расчетная модель, плитные образцы, связанные деформации, напрягающий бетон, двухосное ограничение.

При проектировании самонапряженных конструкций необходимо учитывать особенности исходного напряженно-деформированного состояния, вызванного расширением напрягающего бетона в условиях ограничения деформаций. Многочисленными исследованиями элементов из напрягающего бетона подтверждена зависимость достигаемых деформаций связанного расширения от вида напряженного состояния (одно-, двух-, трехосное), жесткостных характеристик упругого ограничения, режима твердения [1–5].

Выбор расчетной модели для определения числовых значений связанных деформаций и напряжений на стадии расширения напрягающего бетона должен быть сделан в пользу именно той, которая в достаточной мере воспроизводит химическую, физическую и механическую стороны процесса расширения напрягающего бетона с учетом конструктивных и технологических факторов.

Методы определения связанных деформаций и самонапряжений на стадии расширения напрягающего бетона в условиях двухосного ограничения

К настоящему времени предложено несколько методов определения связанных деформаций в ограничивающей арматуре (соответственно, самонапряжений в бетоне) для элементов, находящихся в условиях двухосного ограничения.

Метод 1. В нормах [6] относительная деформация на уровне центра тяжести всей ограничивающей арматуры, расположенной в сечении конструкции к моменту стабилизации процесса расширения, определяется следующим образом:

$$\varepsilon_{s,CE} = \frac{1}{\rho_l \cdot E_s} f_{CE,d} \cdot k_s \cdot k_p \cdot k_e \cdot k_w \cdot k_0, \quad (1)$$

где $f_{CE,d}$ – расчетное самонапряжение напрягающего бетона, принимаемое по таблицам 6, 7 в [6]; ρ_l – суммарный коэффициент армирования сечения; E_s – модуль упругости арматуры; k_s – коэффициент, равный 1,2 при двухосном армировании; k_p – коэффициент, определяемый в зависимости от суммарного коэффициента армирования для рассматриваемого направления по формуле:

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

k_l – коэффициент, определяемый в зависимости от эксцентриситета армирования сечения; k_w – коэффициент, учитывающий влияние начальной прочности напрягающего бетона к началу интенсивного увлажнения; k_0 – коэффициент, учитывающий условия хранения самонапряженной конструкции на стадии расширения напрягающего бетона.

Как видно, в рамках данного подхода двухосное ограничение учитывается только при помощи дополнительного коэффициента $k_s = 1,2$ в мультипликативной модели (1).

Метод 2. В исследованиях [5] на основании экспериментальных данных получены эмпирические зависимости, в которых учитывается взаимное влияние упругого ограничения, ориентированного по направлению главных осей, на величину связанных относительных деформаций расширения:

- по направлению оси x

$$\begin{cases} \varepsilon_{CE,x} = (0,98 + 16 \cdot \rho_{ly} - 12 \cdot \rho_{lx}) \cdot \varepsilon_{CE,x0}, & \text{если } \rho_{lx} \leq \rho_{ly}, \\ \varepsilon_{CE,x} = (0,98 + 16 \cdot \rho_{lx} - 12 \cdot \rho_{ly}) \cdot \varepsilon_{CE,x0}, & \text{если } \rho_{lx} > \rho_{ly}; \end{cases} \quad (3)$$

- по направлению оси y

$$\begin{cases} \varepsilon_{CE,y} = (0,98 + 16 \cdot \rho_{lx} - 12 \cdot \rho_{ly}) \cdot \varepsilon_{CE,y0}, & \text{если } \rho_{ly} \leq \rho_{lx}, \\ \varepsilon_{CE,y} = (0,98 + 16 \cdot \rho_{ly} - 12 \cdot \rho_{lx}) \cdot \varepsilon_{CE,y0}, & \text{если } \rho_{ly} > \rho_{lx}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $\varepsilon_{CE,x0}$, $\varepsilon_{CE,y0}$ – связанная относительная деформация напрягающего бетона по оси x без учета упругого ограничения по оси y и, соответственно, по оси y без учета упругого ограничения по оси x ;

$$\varepsilon_{CE,x0} = \frac{f_{CE,d} \cdot k_{px}}{\rho_{lx} \cdot E_s}; \quad \varepsilon_{CE,y0} = \frac{f_{CE,d} \cdot k_{py}}{\rho_{ly} \cdot E_s}, \quad (5)$$

где ρ_{lx} , ρ_{ly} – коэффициенты армирования по направлению оси x и y соответственно; $f_{CE,d}$, E_s , k_p – аналогично, как и в зависимости (1).

Сравнивая методы 1 и 2, несложно заметить, что составляющие $(0,98 + 16 \cdot \rho_{lx} - 12 \cdot \rho_{ly})$ и $(0,98 + 16 \cdot \rho_{ly} - 12 \cdot \rho_{lx})$ из зависимостей (3) и (4) представляют собой, по сути, уточненное значение коэффициента k_s из зависимости (1).

Метод 3. В работе [3] для случая симметрично армированных плоских самоупроченных элементов предложена эмпирическая зависимость следующего вида:

$$\sigma_{CE,2} = f_{CE,d,2} \cdot \rho_l^{0,702 - 0,0278 f_{CE,d,2}}, \quad (6)$$

где $f_{CE,d,2}$ – расчетное значение самоупрочения, определенное в динамометрических кольцах.

Метод 4. При несимметричном армировании в двух направлениях в исследованиях [2] предложено использовать систему уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{A}{\sigma_{CE,x} + C} \right)^{1/n} - \lambda \left(\frac{A}{\sigma_{CE,y} + C} \right)^{1/n} - B(1 - \lambda) - \frac{\sigma_{CE,x}}{k_x} = 0, \\ \left(\frac{A}{\sigma_{CE,y} + C} \right)^{1/n} - \lambda \left(\frac{A}{\sigma_{CE,x} + C} \right)^{1/n} - B(1 - \lambda) - \frac{\sigma_{CE,y}}{k_y} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь $\sigma_{CE,x}$, $\sigma_{CE,y}$ – самоупрочение в бетоне по направлению осей x и y соответственно; A , B , C – эмпирические коэффициенты; $k_x = \rho_{lx} \cdot E_s \cdot 10^{-2}$, $k_y = \rho_{ly} \cdot E_s \cdot 10^{-2}$ – относительные жесткостные характеристики упругого ограничения; λ – коэффициент поперечных деформаций напрягающего бетона, значение которого в практических целях рекомендуется принимать в пределах 0,46...0,48 [2].

Следует отметить, что все рассмотренные расчетные методы по определению параметров напряженно-деформированного состояния плоских самоупроченных элементов имеют существенные недостатки. *Во-первых*, все представленные расчетные формулы содержат эмпирические коэффициенты или зависимости, которые, в свою очередь, ограничены конкретными условиями проведения эксперимента. *Во-вторых*, ни одна из приведенных зависимостей не учитывает поведение напрягающего бетона в раннем возрасте, а также влияние упругих и неупругих деформаций на величину связанных относительных деформаций расширения. Основываясь на энергетическом подходе, предложенные модели позволяют рассчитать величину самоупрочения только к моменту стабилизации процесса расширения. Подобная модель была представлена и в работе [7]. Следует отметить, что при практическом применении предложенных моделей возникает ряд противоречий, обусловленных различными соотношениями деформаций свободного расширения и стандартной величины самоупрочения $f_{CE,d}$ [6].

Метод 5. Отмеченные недостатки в достаточной мере учтены в деформационной модели для самонапряженных элементов в условиях осевого ограничения [8]. В соответствии с данной моделью приращение связанной относительной деформации по направлению оси x за i -й временной интервал с учетом правила знаков (деформации расширения принимаются со знаком «плюс», а усадки – со знаком «минус») определяется следующим образом:

$$(\Delta \epsilon_{x,s})_i = \frac{D}{D+1} \left((\Delta \epsilon_{\sigma})_i - \sum_{j=1}^{i-1} \left[(\Delta \sigma_{x,c})_j \cdot \frac{\Delta \varphi(t_i, t_j)}{E_{c,28}} \right] \right), \quad (8)$$

где

$$D = \frac{E_c(t_i)}{\left(1 + \frac{E_c(t_i)}{E_{c,28}} \cdot \varphi(t_{i+1/2}, t_i) \right) \cdot E_s \cdot \rho_{x,i}}; \quad (9)$$

$(\Delta \epsilon_{\sigma})_i$ – приращение деформации свободного расширения за i -й временной интервал; $(\Delta \sigma_{x,c})_j$ – приращение напряжений по направлению оси x за j -й временной интервал; $E_{c,28}$ – модуль упругости бетона в возрасте 28 суток; $E_c(t_i)$ – модуль упругости бетона в возрасте t_i , модифицированном с учетом влияния изменения температуры; $\varphi(t_{i+1/2}, t_i)$ – коэффициент ползучести в возрасте бетона $t_{i+1/2}$ от постоянно действующей нагрузки, приложенной в возрасте бетона t_i ; $\Delta \varphi(t_i, t_j)$ – приращение коэффициента ползучести за i -й временной интервал от постоянно действующей нагрузки, приложенной в возрасте бетона t_j ; E_s – модуль упругости арматуры; $\rho_{x,i}$ – коэффициент армирования по направлению оси x .

Вывод расчетной зависимости (8) подробно рассмотрен в [9]. Предложенная аналитическая модель в настоящее время является наиболее рациональной и позволяет определять напряженно-деформированное состояние самонапряженных элементов, начиная с первых суток и до момента стабилизации процесса расширения. Зная функцию, описывающую развитие деформаций свободного расширения $\epsilon_{\sigma(t)}$ во времени, и приращение напряжений на $(i-1)$ временном интервале, получают приращение связанной относительной деформации в ограничивающей связи по направлению оси x на каждом i -м временном интервале. Учитывая коэффициент поперечного расширения, данный метод расчета в равной степени может быть использован и для плоского напряженного состояния. Однако представленная модель имеет один существенный, на наш взгляд, недостаток, что подтвердилось при сравнении с экспериментальными данными, полученными в собственных исследованиях.

Как отмечается в работе [10], расширение образца из напрягающего бетона на каждом последующем итерационном шаге происходит в условиях наличия реакции упругого ограничения, возникающей на предшествующем итерационном шаге и препятствующей расширению бетонного элемента (рис. 1).

Таким образом, положения представленной деформационной модели (метод 5), модифицированные с учетом действия дополнительной реакции упругого ограничения, позволили сформулировать расчетную деформационную модель для самонапряженных элементов, находящихся в условиях плоского напряженного состояния, как при симметричном, так и при несимметричном ограничении деформаций расширения в двух направлениях.

Рисунок 1. – Схема действия дополнительной реакции упругого ограничения

- $\Delta P_{x,mi}$ – реакция упругого ограничения;
- $\Delta l_{x,s}$ – изменение длины упругого ограничения вследствие расширения напрягающего бетона;
- $\Delta l_{x,mi}$ – изменение длины упругого ограничения в результате действия дополнительной реакции;
- $A_c E_c$ – параметры бетонного сечения;
- $A_s E_s$ – параметры упругого ограничения

Деформационная модель для определения связанных деформаций при двухосном ограничении. Основные теоретические положения модифицированной деформационной модели (MSDM) для случая произвольного ограничения, располагаемого по направлению одной главной оси элемента, изложены в [10].

Учитывая действие дополнительной реакции со стороны упругого ограничения для анализируемых условий, выражение (8) следует преобразовать следующим образом:

$$(\Delta \epsilon_{x,s})_i = \frac{D}{D+1} \left((\Delta \epsilon_{\sigma})_i - \sum_{j=1}^{i-1} \left[(\Delta \sigma_{x,c})_j \cdot \frac{\Delta \varphi(t_i, t_j)}{E_{c,28}} \right] \right) - \sum_{j=1}^{i-1} (\Delta \epsilon_{x,s})_j \cdot \rho_{x,j} \cdot \frac{E_s}{E_c(t_{(i-1)+1/2})}. \quad (10)$$

Принимая во внимание, что напрягающий бетон и арматура деформируются совместно, приращение напряжений в направлении оси x за i -й временной интервал определим из выражения:

$$(\Delta\sigma_x)_i = (\Delta\varepsilon_{x,s})_i \cdot E_s \cdot \rho_{x,i}. \quad (11)$$

В случае плоского напряженного состояния напряжения, действующие по одной из осей, связаны с напряжениями, действующими по направлению другой оси, посредством коэффициента Пуассона. Согласно данным, представленным в работе [2], коэффициент Пуассона (μ) для напрягающего бетона в раннем возрасте может быть принят в среднем равным 0,47.

Таким образом, приращение связанных относительных деформаций по направлению каждой оси для случая двухосного ограничения определяется из системы уравнений:

$$\begin{cases} (\Delta\varepsilon_{x,s})_i = \frac{D}{D+1} \left[(\Delta\varepsilon_{cf})_i - \sum_{j=1}^{i-1} \left[(\Delta\sigma_{x,c})_j \cdot \frac{\Delta\varphi(t_i, t_j)}{E_{c,28}} \right] \right] - \sum_{j=1}^{i-1} (\Delta\varepsilon_{x,s})_j \cdot \rho_{x,j} \cdot \frac{E_{x,s}}{E_c(t_{(i-1)+1/2})}, \\ (\Delta\varepsilon_{y,s})_i = \frac{D}{D+1} \left[(\Delta\varepsilon_{cf})_i - \sum_{j=1}^{i-1} \left[(\Delta\sigma_{y,c})_j \cdot \frac{\Delta\varphi(t_i, t_j)}{E_{c,28}} \right] \right] - \sum_{j=1}^{i-1} (\Delta\varepsilon_{y,s})_j \cdot \rho_{y,j} \cdot \frac{E_{y,s}}{E_c(t_{(i-1)+1/2})}. \end{cases} \quad (12)$$

Приращение напряжений, действующих по направлению каждой оси в случае двухосного ограничения, определяют следующим образом:

$$\begin{cases} (\Delta\sigma_x)_i = (\Delta\varepsilon_{x,s})_i \cdot E_{x,s} \cdot \rho_{x,i} - \mu \cdot \left[(\Delta\varepsilon_{y,s})_i \cdot E_{y,s} \cdot \rho_{y,i} \right], \\ (\Delta\sigma_y)_i = (\Delta\varepsilon_{y,s})_i \cdot E_{y,s} \cdot \rho_{y,i} - \mu \cdot \left[(\Delta\varepsilon_{x,s})_i \cdot E_{x,s} \cdot \rho_{x,i} \right]. \end{cases} \quad (13)$$

Зная приращение деформаций и напряжений на каждом итерационном шаге, определяют суммарное напряжение и суммарную связанную относительную деформацию в направлении каждой оси в данный момент времени:

$$\begin{cases} (\sigma_x)_i = (\sigma_x)_{i-1} + (\Delta\sigma_x)_i, \\ (\sigma_y)_i = (\sigma_y)_{i-1} + (\Delta\sigma_y)_i, \end{cases} \quad \begin{cases} (\varepsilon_{x,s})_i = (\varepsilon_{x,s})_{i-1} + (\Delta\varepsilon_{x,s})_i, \\ (\varepsilon_{y,s})_i = (\varepsilon_{y,s})_{i-1} + (\Delta\varepsilon_{y,s})_i. \end{cases} \quad (14)$$

Итерационный расчет продолжают до тех пор, пока не наступит момент стабилизации деформаций расширения, что определяется из функции развития свободных относительных деформаций расширения во времени, получаемой по результатам испытания контрольных образцов в стандартных условиях.

Экспериментальные исследования

Для верификации принятой расчетной модели были проведены экспериментальные исследования шести плитных образцов из напрягающего бетона, армированных плоскими сетками, расположенными в середине высоты сечения. Варьируемым параметром опытных образцов являлась степень упругого ограничения по направлению главных осей. Характеристика исходных материалов и методика проведения экспериментальных исследований подробно представлена в [9].

Номенклатура опытных образцов приведена в таблице 1, а конструктивное решение показано на рисунке 2.

Таблица 1. – Номенклатура опытных образцов

№ серии	Маркировка плит	Площадь сечения арматуры в направлении оси x , мм ²	Коэффициент армирования, ρ_{lx} , %	Площадь сечения арматуры в направлении оси y , мм ²	Коэффициент армирования, ρ_{ly} , %
I	П1-1	339	0,97	58,9	0,16
	П1-2	3Ø12 S500		3Ø5 S500	
II	П2-1	339	0,97	339	0,97
	П2-2	3Ø12 S500		3Ø12 S500	
III	П3-1	58,9	0,16	58,9	0,16
	П3-2	3Ø5 S500		3Ø5 S500	

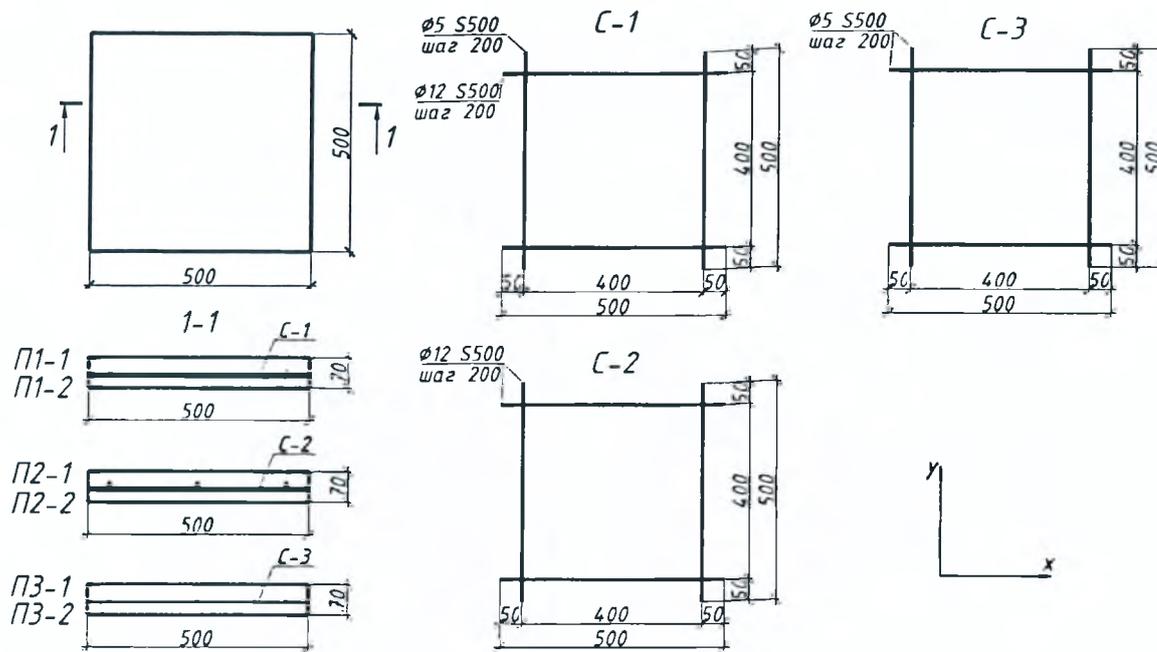
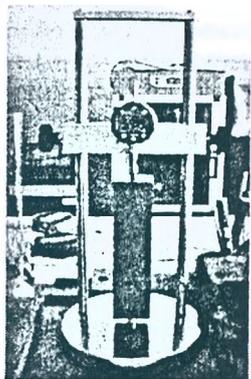
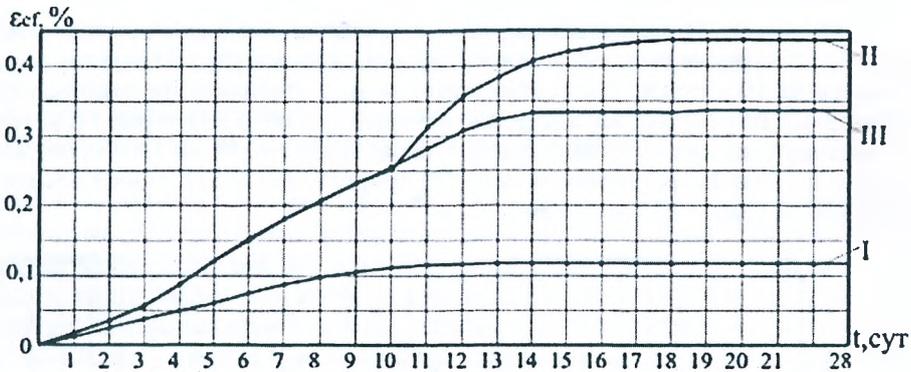


Рисунок 2. – Конструктивное решение опытных образцов

Развитие деформаций свободного расширения напрягающего бетона для каждой серии образцов, измеренного по контрольным образцам, и общий вид контрольных образцов приведены на рисунке 3.



а



б

а – общий вид контрольного образца;

б – развитие деформаций свободного расширения напрягающего бетона для I, II и III серии образцов

Рисунок 3. – Зависимость изменения во времени деформаций свободного расширения, установленная по контрольным образцам-призмам

Характеристики напрягающего бетона контролировали по стандартной методике [11].

Результаты измерения характеристик напрягающего бетона, полученные по контрольным образцам, приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Характеристики напрягающего бетона

№ серии	Деформация свободного расширения к моменту стабилизации $\epsilon_{эф}$, %	Модуль упругости в возрасте 28 сут, ГПа	Самонапряжение бетона в возрасте 28 сут, МПа
I	0,117	42,66	1,4
II	0,437	23,1	2,4
III	0,334	33,3	2,1

Анализ результатов экспериментальных исследований

В результате проведенных экспериментальных исследований получены графики, показывающие развитие во времени деформаций расширения по направлению осей армирования. Кинетика развития связанных деформаций расширения до момента стабилизации процесса расширения для каждой серии образцов приведена на рисунках 4–6. Учитывая то обстоятельство, что аналитическая модель, изложенная в [8], и предлагаемая нами расчетная модель позволяют определить связанные деформации начиная с первых суток и до момента стабилизации процесса расширения, на графиках нанесены кривые, полученные по результатам расчета с помощью указанных моделей.

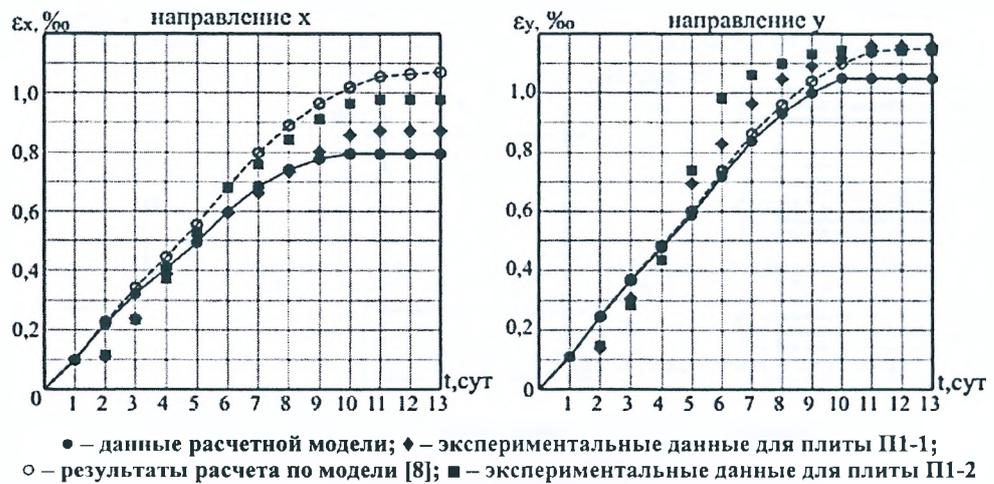


Рисунок 4. – Развитие связанных деформаций расширения по направлению оси x и направлению оси y на стадии твердения для плит серии I

Из данных, приведенных на рисунке 4, следует, что в соответствии с предлагаемой расчетной моделью стабилизация связанных относительных деформаций расширения по главным направлениям начинается на 10-е сутки, что соответствует началу стабилизации деформаций свободного расширения, полученных по результатам измерений контрольных образцов серии I (см. рис. 3, б). Прирост деформаций расширения для всех плит серии I также завершается на 10-е сутки влажного режима хранения. Однако по данным расчетной модели [8] прирост связанных относительных деформаций расширения завершается только к 13-м суткам.

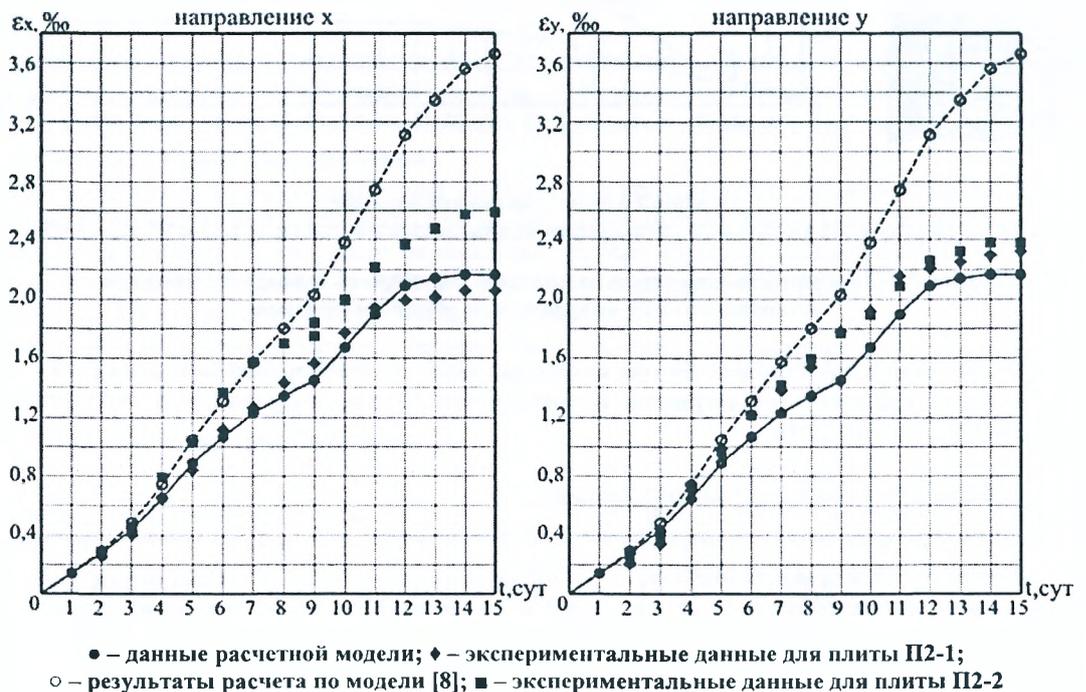


Рисунок 5. – Развитие связанных деформаций расширения по направлению оси x и направлению оси y на стадии твердения для плит серии II

Данные, представленные на рисунке 5, свидетельствуют, что в соответствии с предлагаемой расчетной моделью прирост связанных относительных деформаций расширения по главным направлениям завершается на 14-е сутки, что соответствует началу стабилизации относительных деформаций свободного расширения для серии II, определенных по контрольным образцам (см. рис. 3, б). Прирост связанных деформаций расширения также завершается к 14-м суткам влажного режима хранения. Как и для I серии образцов, при расчете по модели [8] прирост связанных относительных деформаций расширения завершается позднее экспериментальных данных – на 15-е сутки.

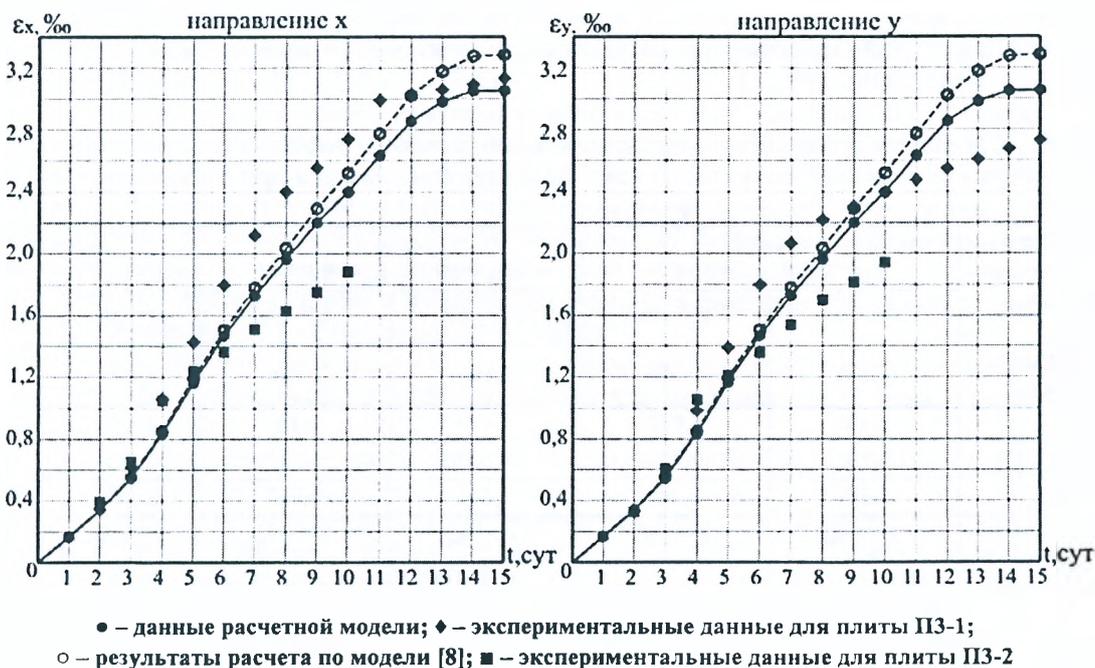


Рисунок 6. – Развитие связанных деформаций расширения по направлению оси x и направлению оси y на стадии твердения для плит серии III

Данные, представленные на рисунке 6, свидетельствуют, что в соответствии с предлагаемой расчетной моделью прирост связанных относительных деформаций расширения по двум осям завершается на 14-е сутки, что соответствует началу стабилизации относительных деформаций свободного расширения для серии III, определенных по контрольным образцам (см. рис. 3, б). Однако, в отличие от серий I и II, при расчете по модели [8] прирост связанных относительных деформаций расширения по двум осям также завершается на 14-е сутки. При этом по данным опытов прирост относительных деформаций завершается позднее – на 15-е сутки влажного режима хранения. Экспериментальные данные для плиты ПЗ-2 начиная с 11-х суток отсутствуют, поскольку произошло отслоение латунных реперов с поверхности плиты.

Следует отметить, что для плит серии II и III коэффициенты армирования в двух направлениях были равными, следовательно, связанные относительные деформации расширения, полученные на основании расчета, в каждый рассматриваемый момент времени равны по двум направлениям. Очевидно, что связанные относительные деформации расширения, измеренные в произвольный момент времени, должны быть одинаковыми по двум направлениям. Однако в результате погрешности измерений относительные деформации расширения имели разброс значений, что, в свою очередь, отразилось на сходимости результатов. Кроме того, наблюдается (см. рис. 4) значительное превышение расчетных значений связанных относительных деформаций расширения по отношению к экспериментальным данным в возрасте бетона 2-х суток (около 50%), что, вероятно, сопряжено с погрешностью измерений.

Анализируя данные, представленные на рисунках 4–6, несложно заметить, что значения связанных относительных деформаций расширения, определенные в соответствии с моделью [8] и предлагаемой расчетной моделью, имеют близкие значения при минимальной жесткости упругого ограничения, соответствующей $\rho = 0,16\%$ (направление x и y в серии III, направление y в серии I) на протяжении всего процесса расширения. В то время как для образцов с жесткостью упругого ограничения, соответствующей $\rho = 0,97\%$, расчетные данные по двум моделям имеют близкие значения только с первых и до четвертых суток (направление x и y в серии II, направление x в серии I). В последнем случае к завершению процесса расширения различие в результатах расчета достигает 40% для II серии плит и 26% для направления x I серии плит.

Как уже было отмечено, расчетная модель [8] не учитывает действие дополнительного усилия, возникающего как реакция со стороны упругого ограничения в виде арматурных стержней, на расширение напрягающего бетона. Очевидно, что с увеличением жесткости упругого ограничения увеличивается и величина дополнительной реакции, что особенно ярко проявляется для активных составов напрягающего бетона (серия II).

Сравнение существующих методов определения параметров напряженно-деформированного состояния плоских самонапряженных элементов выполнено к моменту стабилизации процесса расширения. Отметим, что применение на практике получили только методы 1, 2 и 5, поэтому в настоящей работе целесообразно привести сравнение результатов, полученных по перечисленным методам для каждой серии опытных плит (табл. 3).

Таблица 3. – Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений связанных относительных деформаций расширения самонапряженных плит к моменту стабилизации процесса расширения

Метод расчета	серия I $\rho_{lx} = 0,97\%, \rho_{ly} = 0,16\%$				серия II $\rho_{lx} = 0,97\%, \rho_{ly} = 0,97\%$				серия III $\rho_{lx} = 0,16\%, \rho_{ly} = 0,16\%$	
	$\epsilon_x^{calc}, \%$		$\epsilon_y^{calc}, \%$		$\epsilon_x^{calc}, \%$		$\epsilon_y^{calc}, \%$		$\epsilon_x^{calc}, \%$	$\epsilon_y^{calc}, \%$
Предлагаемая модель	0,794		1,054		2,166		2,166		3,050	3,050
Метод 1 [6]	0,860		3,070		1,470		1,470		4,610	4,610
Метод 2 [5]	0,792		2,850		1,240		1,240		3,793	3,793
Метод 5 [8]	1,071		1,160		3,662		3,662		3,284	3,284
Опытные значения	$\epsilon_x^{exp}, \%$		$\epsilon_y^{exp}, \%$		$\epsilon_x^{exp}, \%$		$\epsilon_y^{exp}, \%$		$\epsilon_x^{exp}, \%$	$\epsilon_y^{exp}, \%$
	П1-1	П1-2	П1-1	П1-2	П2-1	П2-2	П2-1	П2-2	П3-1	П3-1
	0,872	0,978	1,161	1,146	2,058	2,589	2,327	2,381	3,132	2,731
$\epsilon^{exp} / \epsilon^{calc}$										
Предлагаемая модель	1,098	1,230	1,101	1,087	0,950	1,195	1,074	1,099	1,027	0,895
Метод 1 [6]	1,014	1,130	0,378	0,373	1,400	1,761	1,583	1,619	0,679	0,592
Метод 2 [5]	1,101	1,230	0,407	0,402	1,660	2,088	1,876	1,920	0,825	0,720
Метод 5 [8]	0,814	0,913	1,000	0,987	0,562	0,707	0,635	0,650	0,953	0,831

Расчетные и экспериментальные данные, приведенные в таблице 3, показывают, что значения связанных относительных деформаций расширения, полученные по методу 1 действующих норм [6] и по методу 2 [5], значительно отличаются от соответствующих опытных значений, причем различие наблюдается как в сторону завышения расчетных величин (для серий I и III), так и в сторону их занижения (для серии II). В то же время данные, полученные на основании предлагаемой расчетной модели, довольно хорошо (в пределах от 2,6 до 18,6%) совпадают с соответствующими экспериментальными значениями для каждой серии образцов, что, в свою очередь, свидетельствует об универсальности разработанной модели.

В заключение проведенного исследования сделаны следующие **выводы**:

1) предложена расчетная модель для определения связанных относительных деформаций расширения в случае двухосного ограничения, базирующаяся на положениях модифицированной деформационной модели для связанных деформаций для условий одноосного ограничения (MSDM) [10];

2) сопоставление значений связанных относительных деформаций расширения, полученных экспериментально и определенных путем расчета, свидетельствует об адекватности предложенной аналитической модели;

3) основным достоинством предложенной расчетной модели является учет факторов, характеризующих реальные условия твердения конструктивного элемента из напрягающего бетона, что учитывается температурой, при которой развивается процесс твердения, модулем деформации в возрасте 28-ми суток и, самое главное, фактическим законом распределения свободных деформаций расширения напрягающего бетона во времени;

4) данная аналитическая модель позволяет определять связанные относительные деформации расширения при различных коэффициентах армирования в двух направлениях, начиная с первых су-

ток твердения до момента стабилизации процесса расширения. По полученным значениям деформаций определяются значения напряжений в ограничивающих связях, что также имеет важное практическое значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвер, С.Л. Сравнительная оценка самоупрочнения бетонов при одно- и двухосном ограничении деформаций расширения с учетом потерь от усадки / С.Л. Литвер, Н.В. Сабаева // Исследования и применение напрягающего бетона и самоупрочненных конструкций : сб. тр. / НИИЖБ ; под науч. ред. В.В. Михайлова. – М., 1984. – С. 52–61.
2. Михайлов, В.В. Плоские самоупрочненные конструкции / В.В. Михайлов, В.С. Гершвальд // Исследования и применение напрягающего бетона и самоупрочненных конструкций : сб. тр. / НИИЖБ ; под науч. ред. В.В. Михайлова. – М., 1984. – С. 62–67.
3. Литвер, С.Л. Самоупрочнение при двухосном ограничении деформаций расширения / С.Л. Литвер, А.И. Петухов // Исследования и применение напрягающего бетона и самоупрочненных конструкций : сб. тр. / НИИЖБ ; под науч. ред. В.В. Михайлова. – М., 1984. – С. 67–68.
4. Михайлов, В.В. Расширяющийся и напрягающие цементы и самоупрочненные конструкции / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер. – М. : Стройиздат, 1974. – 312 с.
5. Марчук, В.А. Деформации и собственные напряжения несимметрично двухосно армированных плоских элементов из напрягающего бетона на стадии его расширения : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В.А. Марчук. – Брест, 2002. – 176 л.
6. Бетонные и железобетонные конструкции из напрягающего бетона : ТКП 45-5.03-158-2009 / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск : Минстройархитектуры, 2010. – 28 с.
7. Tsuji, Y. Methods of Estimating Chemical Prestress and Expansion Distribution in Expansive Concrete Subjected to Uniaxial Restraint / Y. Tsuji. – Concrete Library of JSCE, 1984. – № 3. – P. 131–143.
8. Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete / I. Hidetoshi [et al.] // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2004. – Vol. 2, № 2. – P. 155–174.
9. Тур, В.В. Определение параметров напряженно-деформированного состояния плоских самоупрочненных элементов на стадии твердения / В.В. Тур, А.А. Кондратчик, О.Г. Санникова // Вестн. БрГТУ. Сер. Стр-во и архитектура. – 2016. – № 1(97). – С. 70–76.
10. Тур, В.В. Модель, применяемая для расчета связанных деформаций и самоупрочнений в элементах из напрягающего бетона / В.В. Тур, О.С. Семенов // Вестн. БрГТУ. Сер. Стр-во и архитектура. – 2016. – № 1(97). – С. 54–70.
11. Бетоны напрягающие. Технические условия : СТБ 2101-2010. – Введ. 28.07.2010. – Минск : Стройтехнорм, 2010. – 19 с.

Поступила 02.12.2016

**A DESIGN MODEL FOR RESTRAINED STRAINS ESTIMATION
AT EXPANSION STAGE OF CONCRETE
IN TWO-WAY RESTRAINT CONDITIONS**

V. TUR, V. SANNIKAVA

Methods for restrained strains and self-stresses at expansion stage of concrete in two-way restraint conditions are considered. A model for restrained strains estimation at expansion stage of concrete in two-way restraint conditions is proposed. The experimental results of plane members are presented. The comparative analysis of experimental and calculated restrained strains data is given.

Keywords: *computational model, slab samples associated deformation, strain of concrete, the biaxial constraint.*