

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВЯЗАННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПЛОСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА

О. Г. Санникова¹, В. В. Тур²

¹ М. т. н., старший преподаватель кафедры геотехники и транспортных коммуникаций УО «БрГТУ», Брест, Беларусь, garahog@list.ru

² Д. т. н., профессор, зав. кафедрой технологии бетона и строительных материалов УО «БрГТУ», Брест, Беларусь

Реферат

В работе рассмотрены расчетные модели для определения параметров напряженно-деформированного состояния самонапряженных элементов при двухосном ограничении деформаций расширения. Приведены основные положения аналитической модели для определения связанных деформаций и напряжений плоских элементов из напрягающего бетона, базирующейся на модифицированной деформационной модели (MSDM) для случая произвольного линейного ограничения. Выполнена верификация разработанной модели на основании результатов собственных экспериментальных исследований, а также результатов экспериментальных исследований, приведенных в научно-технической литературе.

Ключевые слова: напрягающий бетон, деформации, напряжения, упругое ограничение, аналитическая модель.

VERIFICATION OF CALCULATION MODEL FOR DETERMINATION OF RELATED DEFORMATIONS AND STRESSES OF FLAT ELEMENTS MADE OF STRESS CONCRETE

O. G. Sannikova, V. V. Tur

Abstract

Paper presents the review of design models for estimation the stress-strain parameters of self-stressing elements under biaxial restraint conditions depending on the basic concept. The general theoretical background of analytical model for estimation the restrained expansion strains and stresses of plane expansive concrete elements based on the modified strains development model (MSDM) is proposed. Validation of proposed model was carried out based on the own experimental results as well as the experimental results of other researchers.

Keywords: expansive concrete, strains, stresses, restraint, analytical model.

Введение

Применение напрягающего бетона позволяет не только снизить негативное влияние усадочных деформаций, неизбежно возникающих в гидратирующей цементной системе, но и создать предварительное напряжение в конструктивном элементе произвольного сечения. Как показывает практика, напрягающий бетон в значительной мере применяют в конструктивных элементах с двухосным и трехосным ограничением деформаций расширения (например, плиты полов производственных зданий; цилиндрические емкостные сооружения, дорожные и аэродромные покрытия, железобетонные трубы и др.), что в свою очередь основано на рациональном использовании энергии расширения твердеющей системы по отношению к линейно ограниченному элементу. В то же время, большинство расчетных методов для определения параметров напряженно-деформированного состояния самонапряженных элементов с ортогональным армированием в двух или трех направлениях не вполне корректно отражают особенности формирования структуры таких элементов на этапе расширения напрягающего бетона, что, безусловно, во многих случаях приводит к ошибочным результатам.

1. Расчетные модели для определения параметров напряженно-деформированного состояния самонапряженных элементов при двухосном ограничении деформаций расширения

К настоящему времени все расчетные модели для определения связанных деформаций в ограничивающей арматуре и самонапряжений в бетоне для элементов, находящихся в условиях двухосного ограничения в плоскости, в зависимости от основополагающего подхода можно классифицировать следующим образом:

- 1) модели, основанные на энергетическом подходе;
- 2) эмпирические модели, основанные на экспоненциальной зависимости связанных деформаций и степени упругого ограничения;
- 3) полуэмпирические модели.

Модели, основанные на энергетическом подходе.

Согласно энергетическому подходу, сформулированному в работах проф. В. В. Михайлова [1], бетон на напрягающем цементе

расширяется в той степени, в какой увеличению его объема сопротивляется арматура:

$$U_{s,CE} = 0,5(F_c \cdot \epsilon_{c,CE} + F_s \cdot \epsilon_{s,CE}) = 0,5 \cdot E_s \cdot \rho_s \cdot \epsilon_{s,CE}^2, \quad (1)$$

где $U_{s,CE}$ – работа связанной деформации; F_c , F_s – уравновешенное усилие в бетоне и арматуре соответственно, возникающее в результате расширения напрягающего бетона; $\epsilon_{c,CE}$, $\epsilon_{s,CE}$ – деформации в бетоне и арматуре соответственно; E_s – модуль упругости арматуры; ρ_s – коэффициент армирования.

Практическое применение закона сохранения энергии по отношению к расширяющейся системе приведено в нормах [2] в следующем виде:

$$\epsilon_{s,CE} = \frac{1}{\rho_l \cdot E_s} f_{CE,d} \cdot K_s \cdot K_p \cdot K_e \cdot K_w \cdot K_0, \quad (2)$$

где $\epsilon_{s,CE}$ – относительная деформация на уровне центра тяжести всей ограничивающей арматуры, расположенной в сечении конструкции к моменту стабилизации процесса расширения; $f_{CE,d}$ – расчетное самонапряжение напрягающего бетона, принимаемое в зависимости от марки бетона по самонапряжению, определяемой в стандартных условиях [3] в возрасте 28 суток на образцах с коэффициентом осевого продольного армирования $\rho_l = 1\%$ при модуле упругости арматуры $E_s = 200$ ГПа; ρ_l – суммарный коэффициент армирования сечения; E_s – модуль упругости арматуры; K_s – коэффициент, принимаемый равным 1,0 при одноосном, 1,2 при двухосном и 1,5 при трехосном армировании; K_p – коэффициент, определяемый в зависимости от суммарного коэффициента армирования (ρ_l) для рассматриваемого направления; K_e – коэффициент, определяемый в зависимости от эксцентриситета армирования сечения; K_w – коэффициент, учитывающий влияние начальной прочности напрягающего бетона к началу интенсивного увлажнения.

нения $f_{CE,k0}$; k_0 – коэффициент, учитывающий условия хранения самоупроченной конструкции на стадии расширения напрягающего бетона, принимаемый равным от 0,18 до 1,15.

Позднее закон сохранения энергии был сформулирован также в виде зависимости (1) профессором Tsuji [4] для элементов из напрягающего бетона с одноосным ограничением. Для самоупроченных элементов с армированием в двух направлениях такой подход был реализован в исследованиях [5] с учетом коэффициента Пуассона для бетона ($\nu = 0,2$):

$$\begin{cases} U_{cx} = \sum \rho_x \cdot \frac{E_s^2 \cdot \epsilon_{sx}}{E_c} \cdot (\rho_x \cdot \Delta \epsilon_{sx} - \nu \cdot \rho_y \cdot \Delta \epsilon_{sy}) \\ U_{cy} = \sum \rho_y \cdot \frac{E_s^2 \cdot \epsilon_{sy}}{E_c} \cdot (\rho_y \cdot \Delta \epsilon_{sy} - \nu \cdot \rho_x \cdot \Delta \epsilon_{sx}), \end{cases} \quad (3)$$

где U_{cx} , U_{cy} – работа напрягающего бетона по направлению оси X и Y соответственно; ρ_x , ρ_y – коэффициент армирования по направлению оси X и Y соответственно; ϵ_{sx} , ϵ_{sy} – связанные деформации по направлению оси X и Y соответственно; E_c – модуль упругости напрягающего бетона; E_s – модуль упругости арматуры.

Следует отметить, что, базируясь на законе сохранения энергии, был предложен ряд зависимостей для определения параметров напряженно-деформированного состояния плоских самоупроченных элементов с двухосным ограничением равной [6] и произвольной жесткости [7], однако такие подходы не нашли широкого применения на практике.

Эмпирические модели, основанные на экспоненциальной зависимости связанных деформаций и степени упругого ограничения.

Учитывая характер развития связанных деформаций на этапе расширения напрягающего бетона, вполне закономерно появление расчетных методов, основанных на степенной функции вида:

$$y = a \cdot x^b, \quad (4)$$

где a , b – эмпирические коэффициенты; x – базовый параметр, в качестве которого в большинстве случаев принимают коэффициент армирования; y – связанные деформации или самоупрочение элемента из напрягающего бетона.

В исследованиях [8] была предложена зависимость для определения напряжений ($\sigma_{CE,2}$) в случае симметричного армирования (ρ_l) в двух направлениях:

$$\sigma_{CE,2} = f_{CE,d,2} \cdot \rho_l^{0,702-0,0278 \cdot f_{CE,d,2}}, \quad (5)$$

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

Полагая упругий характер деформирования напрягающего бетона, для определения связанных деформаций в самоупроченных элементах, армированных сетками из стекловолокна, в работе [9] предложена следующая зависимость:

$$\epsilon''_l = \{\epsilon_l + \nu \cdot \epsilon_w [1 - \exp(-\alpha_1 \cdot \rho_w)]\} \cdot \exp(-\alpha_2 \cdot \rho_l), \quad (6)$$

где ϵ''_l – конечная связанная деформация в продольном направлении l ; ϵ_l – деформация свободного расширения в продольном направлении l ; ϵ_w – деформация свободного расширения в поперечном направлении w ; ρ_l , ρ_w – коэффициент армирования в продольном и поперечном направлении соответственно; α_1, α_2 – эмпирические коэффициенты; ν – коэффициент Пуассона для бетона ($\nu = 0,2$).

Полуэмпирические модели

Наиболее рациональный полуэмпирический подход сформулирован в работе [10] для определения связанных деформаций двухосно-армированных самоупроченных элементов с учетом упруго-пластического характера развития деформаций:

$$\begin{cases} \epsilon_{RX} = \epsilon_{Rx0} - K_x \cdot \epsilon_{RY} + \nu \cdot \epsilon_{ce,y} \\ \epsilon_{RY} = \epsilon_{Ry0} - K_y \cdot \epsilon_{RX} + \nu \cdot \epsilon_{ce,x}, \end{cases} \quad (7)$$

где ϵ_{RX} , ϵ_{RY} – связанные деформации в направлении оси X и Y соответственно; ϵ_{Rx0} , ϵ_{Ry0} – связанные деформации в условиях одноосного ограничения в направлении оси x и y соответственно; $\epsilon_{ce,x}$, $\epsilon_{ce,y}$ – упругие деформации в условиях одноосного ограничения в направлении оси X и Y соответственно; ν – коэффициент Пуассона ($\nu = 0,2$); K_x , K_y – коэффициент, учитывающий снижение связанных деформаций расширения в условиях двухосного ограничения в направлении оси X и Y соответственно, в общем случае определяется в зависимости от коэффициента армирования (ρ).

Анализируя представленные выше расчетные модели для определения параметров напряженно-деформированного состояния плоских элементов из напрягающего бетона, следует отметить ряд недостатков, ограничивающих применение таких подходов для широкого класса плоских самоупроченных элементов с произвольным армированием в ортогональных направлениях.

Во-первых, большинство моделей [3–9] не учитывает упруго-пластический характер развития деформаций напрягающего бетона в условиях ограничения. Следовательно, в случае двухосного ограничения применение коэффициента Пуассона по отношению к общей относительной деформации самоупроченного элемента (см. формулы (3, 6)), а не к ее упругой части (см. формулу 7), является некорректным.

Во-вторых, все расчетные зависимости (см. формулы 2–7) содержат эмпирические коэффициенты, значение которых определено на основании ограниченных экспериментальных данных. Кроме того, некоторые исследования были выполнены на элементах, которые не совсем являются плоскими. Например, в работе [5] были рассмотрены опытные образцы с размерами 100x100x100 мм, в работе [9] – образцы с размерами 400x100x100 мм, а в работе [10] – образцы с размерами 500x150x150 мм.

В-третьих, модель, приведенная в нормах [2], в качестве базового параметра принимает расчетное самоупрочение напрягающего бетона $f_{CE,d}$, несмотря на различное соотношение между последним и величиной деформации свободного расширения.

В-четвертых, все модели, за исключением модели [10], позволяют определить связанные деформации и напряжения только к моменту стабилизации процесса расширения и не учитывают особенности напрягающего бетона в раннем возрасте.

Таким образом, разработка расчетной модели, позволяющей определять связанные деформации и напряжения в плоских элементах из напрягающего бетона с учетом влияния упруго-пластических деформаций в раннем возрасте и наличия упругого ограничения в ортогональных направлениях, является актуальной задачей.

2. Основные положения расчетной модели для определения связанных деформаций и напряжений плоских элементов из напрягающего бетона

Наиболее рациональный подход для определения параметров напряженно-деформированного состояния, учитывающий физико-механические характеристики напрягающего бетона в раннем возрасте, приведен в деформационной модели [11] для линейного напряженного состояния, которая позволила в дальнейшем сформулировать модифицированную деформационную модель (MSDM) для случая произвольного ограничения, располагаемого по одному направлению элемента [12]. Основное достоинство модифицированной деформационной модели заключается в учете кумулятивной реакции со стороны упругого ограничения, которая является дополнительным ограничением деформаций расширения на каждом элементарном промежутке времени.

В настоящей работе приведены основные положения деформационного метода для оценивания параметров напряженно-деформированного состояния плоских элементов из напрягающего бетона с двухосным ограничением произвольной жесткости, базирующегося на модифицированной деформационной модели (MSDM) [12].

Основные предпосылки предлагаемой расчетной модели для случая двухосного ограничения в плоскости следующие:

1) наличие упругого ограничения в ортогональном направлении учитывается посредством коэффициента Пуассона для бетона в раннем возрасте $\nu = 0,2$ только по отношению к упругой деформации напрягающего бетона на i -ом временном интервале;

2) связанная относительная деформация на i -ом временном интервале в каждом ортогональном направлении представляет собой алгебраическую сумму относительной деформации свободного расширения ($\epsilon_{cf}(t_{i+1/2})$), упругой относительной деформации ($\epsilon_{el,x}(t_{i+1/2})$ – в направлении оси X , $\epsilon_{el,y}(t_{i+1/2})$ – в направлении оси Y), неупругой относительной деформации от ползучести бетона ($\epsilon_{pl,x}(t_{i+1/2}, t_0)$ – в направлении оси X , $\epsilon_{pl,y}(t_{i+1/2}, t_0)$ – в направлении оси Y) на i -ом временном интервале и упругой относительной деформации в результате действия дополнительной реакции упругого ограничения на $(i-1)$ -ом временном интервале ($\epsilon_{cum,x}(t_{(i-1)+1/2})$ – в направлении оси X , $\epsilon_{cum,y}(t_{(i-1)+1/2})$ – в направлении оси Y):

$$\begin{cases} \epsilon_{s,x}(t_{i+1/2}) = \epsilon_{cf}(t_{i+1/2}) + [\epsilon_{el,x}(t_{i+1/2}) - \nu \cdot \epsilon_{el,y}(t_{i+1/2})] + \\ + \epsilon_{pl,x}(t_{i+1/2}, t_0) + \epsilon_{cum,x}(t_{(i-1)+1/2}); \\ \epsilon_{s,y}(t_{i+1/2}) = \epsilon_{cf}(t_{i+1/2}) + [\epsilon_{el,y}(t_{i+1/2}) - \nu \cdot \epsilon_{el,x}(t_{i+1/2})] + \\ + \epsilon_{pl,y}(t_{i+1/2}, t_0) + \epsilon_{cum,y}(t_{(i-1)+1/2}); \end{cases} \quad (8)$$

3) равнодействующие усилия в ограничивающей арматуре и в бетонном сечении взаимно уравновешены на каждом i -ом временном интервале.

В общем случае приращения связанных относительных деформаций в ортогональных направлениях x и y на произвольном временном интервале могут быть определены следующим образом:

$$\begin{cases} (\Delta\epsilon_{s,x})_i = (\Delta\epsilon_{cf})_i - [(\Delta\sigma_{c,x})_i - \nu \cdot (\Delta\sigma_{c,y})_i] \cdot J(t_{i+1/2}, t_i) - \\ - \sum_{j=1}^{i-1} \left[(\Delta\sigma_{c,x})_j \cdot \frac{\Delta\varphi(t_i, t_j)}{E_{c,28}} \right] - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} (\Delta\sigma_{c,x})_j}{E_c(t_{(i-1)+1/2})}; \\ (\Delta\epsilon_{s,y})_i = (\Delta\epsilon_{cf})_i - [(\Delta\sigma_{c,y})_i - \nu \cdot (\Delta\sigma_{c,x})_i] \cdot J(t_{i+1/2}, t_i) - \\ - \sum_{j=1}^{i-1} \left[(\Delta\sigma_{c,y})_j \cdot \frac{\Delta\varphi(t_i, t_j)}{E_{c,28}} \right] - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} (\Delta\sigma_{c,y})_j}{E_c(t_{(i-1)+1/2})}; \end{cases} \quad (9)$$

где $(\Delta\sigma_{c,x})_j$ и $(\Delta\sigma_{c,y})_j$ – приращение напряжений в направлении x и y соответственно на j -ом временном интервале; $(\Delta\sigma_{c,x})_i$ и $(\Delta\sigma_{c,y})_i$ – приращение напряжений в направлении x и y соответственно на i -ом временном интервале; $(\Delta\epsilon_{cf})_i$ – приращение относительной деформации свободного расширения на i -ом временном интервале; $E_{s,x}$ и $E_{s,y}$ – модуль упругости ограничивающей арматуры в направлении x и y соответственно; $\rho_{s,x}$ и $\rho_{s,y}$ – коэффициент армирования в направлении x и y соответственно; $J(t_{i+1/2}, t_i)$ – функция ползучести; $\Delta\varphi(t_i, t_j)$ – приращение коэффициента ползучести за i -й временной интервал от постоянно действующей нагрузки, приложенной в возрасте бетона t_j ; $E_{c,28}$ – модуль упругости напрягающего бетона в возрасте 28 суток; $E_c(t_{(i-1)+1/2})$ – модуль упругости напрягающего бетона в возрасте $(t_{(i-1)+1/2})$ суток.

Определение всех составляющих в выражении (9) детально приведено в [13].

С учетом того, что напрягающий бетон и арматура деформируются совместно, приращение напряжений на i -ом временном интервале в ортогональных направлениях x и y можно определить следующим образом:

$$\begin{cases} (\Delta\sigma_{c,x})_i = (\Delta\epsilon_{s,x})_i \cdot E_{s,x} \cdot \rho_{s,x} \\ (\Delta\sigma_{c,y})_i = (\Delta\epsilon_{s,y})_i \cdot E_{s,y} \cdot \rho_{s,y}. \end{cases} \quad (10)$$

При известных приращениях деформаций и напряжений на каждом итерационном шаге можно определить общие напряжения в бетоне и общие связанные относительные деформации в арматуре по направлению осей X и Y в данный момент времени:

$$\begin{cases} (\epsilon_{s,x})_i = (\epsilon_{s,x})_{i-1} + (\Delta\epsilon_{s,x})_i; \quad \left\{ \begin{aligned} (\sigma_{c,x})_i &= (\sigma_{c,x})_{i-1} + (\Delta\sigma_{c,x})_i \\ (\sigma_{c,y})_i &= (\sigma_{c,y})_{i-1} + (\Delta\sigma_{c,y})_i \end{aligned} \right. \\ (\epsilon_{s,y})_i = (\epsilon_{s,y})_{i-1} + (\Delta\epsilon_{s,y})_i; \end{cases} \quad (11)$$

Окончание расчета определяется исходя из закона распределения свободных относительных деформаций расширения во времени, получаемого по результатам испытаний контрольных образцов в стандартных условиях.

3. Верификация на фоне опытных данных расчетной модели для определения связанных деформаций и напряжений плоских элементов из напрягающего бетона

Верификация расчетной модели для определения связанных деформаций расширения и напряжений в случае двухосного ограничения в плоскости была выполнена как на основании собственных экспериментальных исследований плитных образцов из напрягающего бетона, армированных плоскими сетками, расположенными в центре высоты сечения, так и на основании результатов исследований двухосно ограниченных самонапряженных элементов, приведенных в научно-технической литературе [5, 7].

Составы бетонной смеси для опытных образцов, принятых для верификации предлагаемой модели, приведены в таблице 1. Геометрические характеристики рассматриваемых опытных образцов вместе с характеристиками упругого ограничения и напрягающего бетона приведены в таблице 2.

4. Результаты верификации

На основании исходных данных, приведенных в таблице 2, для всех рассматриваемых образцов были рассчитаны значения связанных деформаций, которые были сопоставлены с аналогичными данными, полученными экспериментальным путем. Кинетика развития связанных деформаций, полученных в опытах и рассчитанных по предлагаемой модели, приведена на рисунках 1–3. На рисунках 1–3 также приведены данные, полученные на основании расчета по модели [11], позволяющие оценить влияние дополнительной кумулятивной реакции со стороны упругого ограничения. Отметим, что при расчете по модели [11] наличие ограничения в ортогональном направлении учитывали при помощи коэффициента Пуассона по отношению к упругой деформации.

Данные, приведенные на рисунках 1–3, свидетельствуют о том, что игнорирование действия дополнительной реакции упругого ограничения в расчете (модель [11]) приводит к существенному различию между экспериментальными и теоретическими значениями связанных деформаций расширения. Следует отметить, что такое различие в значительной степени наблюдается при увеличении энергоемкости напрягающего бетона и осевой жесткости $E_s A_s$ упругого ограничения. Так, для опытных образцов P2 при процентах армирования $\rho_{s,x} = \rho_{s,y} = 0,97\%$ и деформации свободного расширения $\epsilon_{cf} = 0,437\%$ максимальное различие между опытными и рассчитанными по предлагаемой модели значениями связанных относительных деформаций в течение процесса расширения составило 9,03% и 6,5% соответственно в направлении оси X и оси Y , в то время как различие между опытными и рассчитанными по модели [11] аналогичными значениями деформаций составило 110,3% и 105,5% соответственно в направлении оси X и оси Y .

Таблица 1 – Составы бетонной смеси опытных образцов (на 1 м³)

Источник	Напрягающий цемент, кг	Мелкий заполнитель, кг	Крупный заполнитель, кг	Вода, кг	В/Ц
[7]	Портландцемент СЕМ I 42,5R – 79%	1120 (песок с модулем крупности $M_{кр}=2,7$)	-	360	0,32
	Глиноземистый цемент – 12%				
	Гипс – 9%				
[5]	Цемент (С)	830	951	175	0,55
	Расширяющая добавка (ЕХ)				
Собственные испытания	Портландцемент СЕМ I 42,5R – 74%	500 (песок с модулем крупности $M_{кр}=3,4$)	1150 (щебень гранитный фракции 5-20мм)	215	0,43
	Глиноземистый цемент – 14%				
	Гипс – 12%				

Таблица 2 – Номенклатура опытных образцов

Источник	Маркировка образца	Конструктивное решение образцов	Параметры армирования				Параметры напрягающего бетона	
			в направлении оси X		в направлении оси Y		ϵ_{cf} , %	$E_{c,28}$, ГПа
			$\rho_{s,x}$, %	$E_{s,x}$, ГПа	$\rho_{s,y}$, %	$E_{s,y}$, ГПа		
[7]	1P-1*		0,105	203	0,526	203	0,75	29
	1P-2*		0,263	203	0,526	203	0,75	29
	1P-3*		0,373	193,3	0,526	203	0,75	29
	1P-4*		0,284	203	0,933	193,3	1,34	29
	1P-5*		0,726	189,7	0,933	193,3	1,34	29
	1P-6*		1,016	189,7	2,033	189,7	1,57	29
	2P-1**		0,560	193,3	0,560	193,3	0,08	29
	2P-2**		1,120	193,3	0,560	193,3	0,08	29
	2P-3**		1,493	193,3	0,560	193,3	0,08	29
	2P-4**		2,240	193,3	0,560	193,3	0,08	29
	2P-5**		2,981	197,6	0,560	193,3	0,08	29
	2P-6**		0,560	193,3	1,120	193,3	0,20	29
	2P-7**		2,240	193,3	1,120	193,3	0,20	29
	2P-8**		1,120	193,3	1,493	193,3	0,23	29
	[5]		X8Y8		1,020	2,050	206	206
X12Y8		2,310	2,050		206	206	0,02	26,3
X8Y12		1,020	4,740		206	206	0,02	26,3
X12Y12		2,310	4,740		206	206	0,02	26,3
Собственные испытания	P1		0,970	0,160	200	200	0,117	42,66
	P2		0,970	0,970	200	200	0,437	23,1
	P3		0,160	0,160	200	200	0,334	33,3

Примечание: $\rho_{s,x}$, $\rho_{s,y}$ – коэффициент армирования в направлении оси X и Y соответственно; $E_{s,x}$, $E_{s,y}$ – модуль упругости арматуры в направлении оси X и Y соответственно; ϵ_{cf} – деформации свободного расширения напрягающего бетона к моменту стабилизации процесса расширения; $E_{c,28}$ – модуль упругости напрягающего бетона в возрасте 28 сут.; * - образцы с высокой энергией расширения напрягающего бетона; ** - образцы с низкой энергией расширения напрягающего бетона

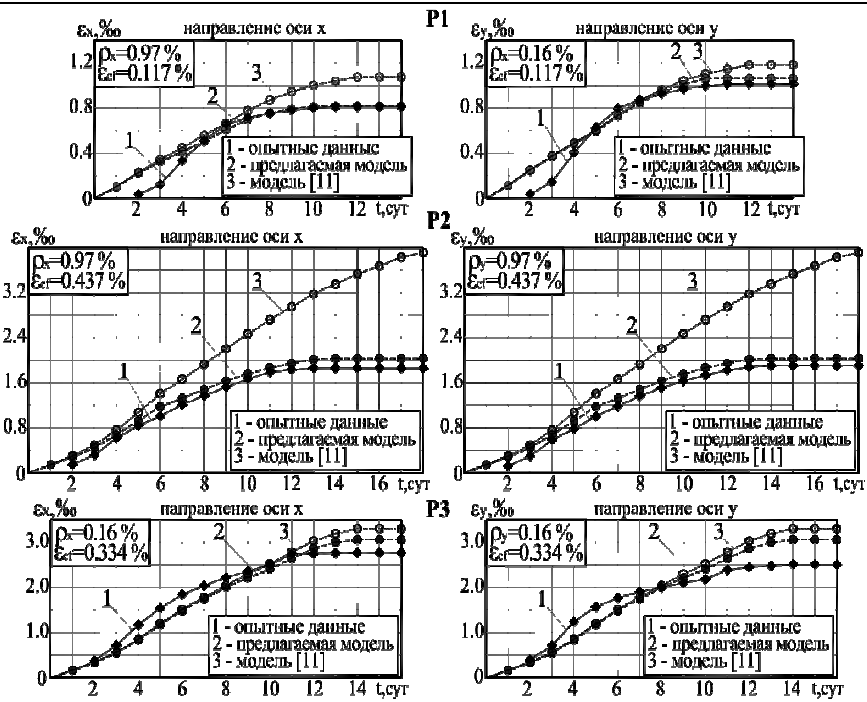


Рисунок 1 – Связанные деформации расширения для опытных образцов P1, P2 и P3

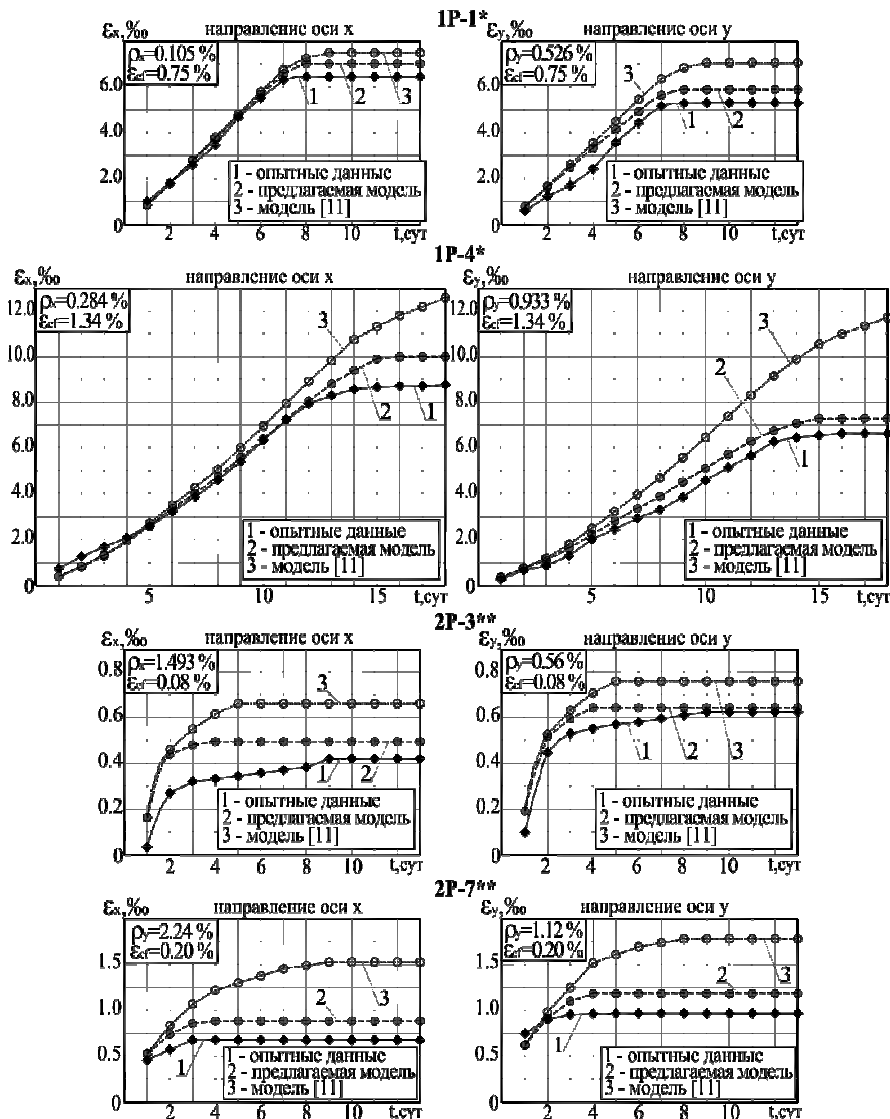


Рисунок 2 – Связанные деформации расширения для опытных образцов 1P-1*, 1P-4*, 2P-3* и 2P-7*

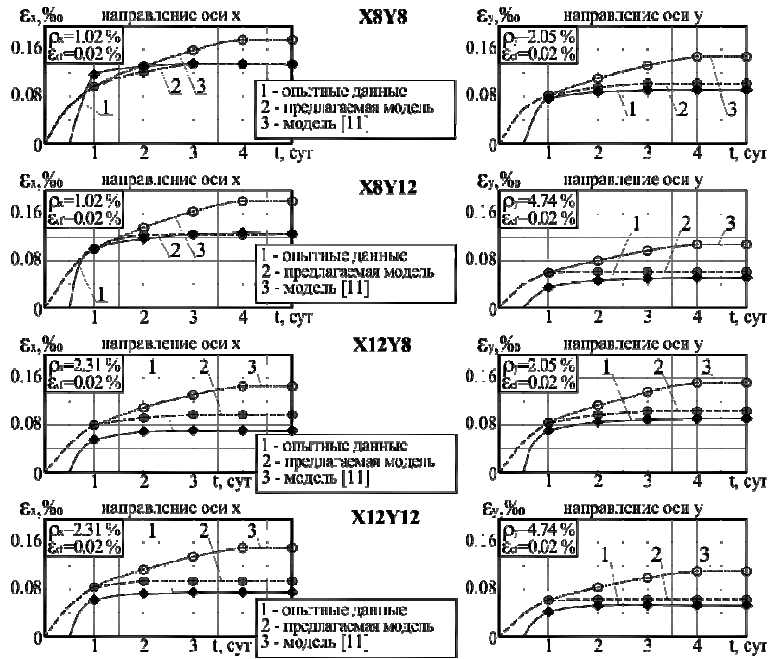


Рисунок 3 – Связанные деформации расширения для опытных образцов X8Y8, X8Y12, X12Y8 и X12Y12

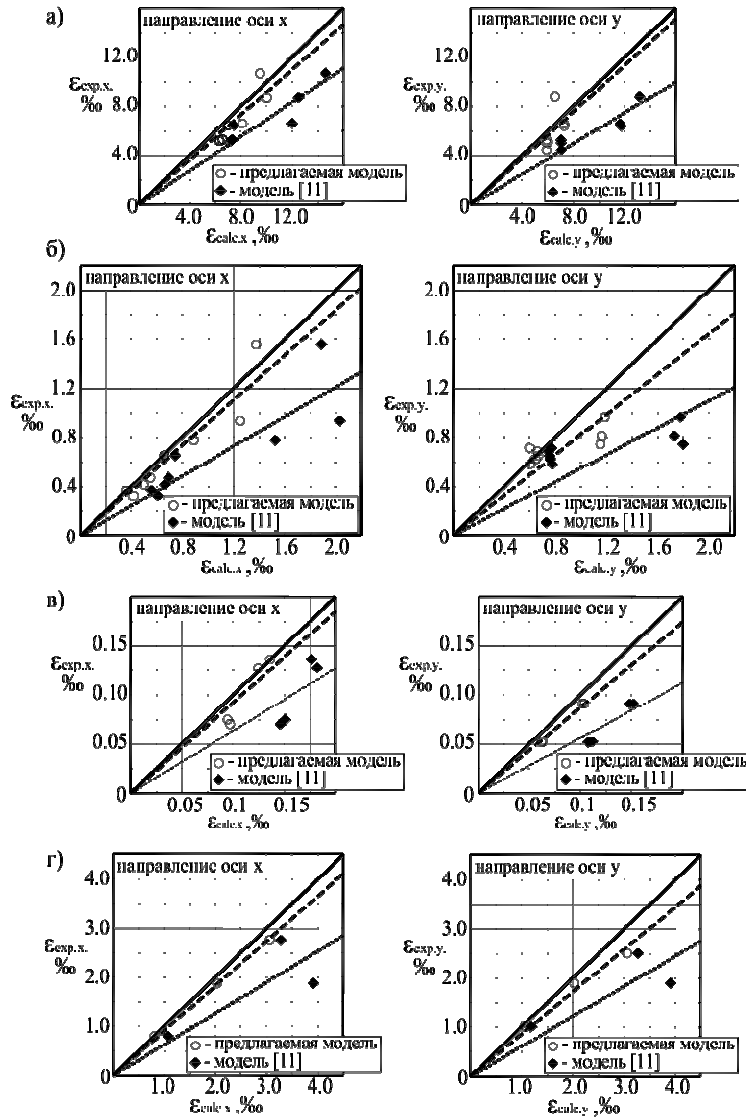


Рисунок 4 – Сопоставление расчетных и экспериментальных значений связанных деформаций к моменту стабилизации процесса расширения а) образцы 1P1*-1P6*; б) образцы 2P1**-2P8**; в) образцы X8Y8, X12Y8, X8Y12, X12Y12; г) образцы P1, P2, P3

В то же время, при незначительной степени упругого ограничения и низкой энергоактивности напрягающего бетона существенного различия между рассчитанными по предлагаемой модели и по модели [11] значениями связанных деформаций не наблюдается. Так, для опытных образцов РЗ при процентах армирования $\rho_{s,x}=\rho_{s,y}=0,16\%$ и деформации свободного расширения $\epsilon_{cf}=0,334\%$ максимальное различие между опытными и рассчитанными по предлагаемой модели значениями связанных относительных деформаций в течение процесса расширения составило 10,5% и 22,4% соответственно в направлении оси x и оси y , в то время как различие между опытными и рассчитанными по модели [11] аналогичными значениями деформаций составило 19,1% и 32% соответственно в направлении оси x и оси y .

Для выявления ошибки моделирования расчетной модели для определения параметров напряженно-деформированного состояния плоских самонапряженных элементов с произвольным ограничением в двух направлениях были построены графики (рисунок 4), на которых приведены рассчитанные по предлагаемой модели значения связанных деформаций к моменту стабилизации процесса расширения ($\epsilon_{calc,x}$, $\epsilon_{calc,y}$) по отношению к соответствующим экспериментальным данным ($\epsilon_{exp,x}$, $\epsilon_{exp,y}$) для всех опытных образцов (см. таблицу 2). На указанных графиках также приведены рассчитанные по модели [11] значения связанных деформаций.

Как следует из рисунка 4, лучшая сходимость между рассчитанными и опытными значениями связанных деформаций к моменту стабилизации процесса расширения наблюдается в случае расчета по предлагаемой аналитической модели. В среднем различие между рассчитанными по разработанной модели и опытными значениями связанных деформаций составляет: в направлении оси x 8,9%, 8,5%, 8%, 9,4% соответственно для образцов 1P-1* - 1P-6*, 2P-1** - 2P-8**, X8Y8 - X12Y12, P1 - P3; в направлении оси y 5,6%, 21,3%, 14,6%, 16,4% соответственно для образцов 1P-1* - 1P-6*, 2P-1** - 2P-8**, X8Y8 - X12Y12, P1 - P3. Различия между рассчитанными по модели [11] и опытными значениями связанных деформаций составляет: в направлении оси x 43,6%, 64,7%, 57%, 57,5% соответственно для образцов 1P-1* - 1P-6*, 2P-1** - 2P-8**, X8Y8 - X12Y12, P1 - P3; в направлении оси y 60%, 82%, 77,6%, 64,2% соответственно для образцов 1P-1* - 1P-6*, 2P-1** - 2P-8**, X8Y8 - X12Y12, P1 - P3.

Заключение

Разработанная аналитическая модель позволяет учитывать связанные деформации и напряжения в самонапряженных элементах с ортогональным армированием произвольной жесткости на протяжении всего периода расширения напрягающего бетона. Основное преимущество предлагаемой модели заключается в учете дополнительной кумулятивной реакции со стороны упругого ограничения (как и в случае линейного ограничения в модели MSDM), а также учета наличия армирования в ортогональном направлении посредством применения коэффициента Пуассона только по отношению к упругой части деформации.

Предлагаемая модель дает наиболее адекватную оценку, что было подтверждено как собственными экспериментальными данными, так и экспериментальными данными, приведенными в научно-технической литературе.

Список цитированных источников

1. Михайлов, В. В. Расширяющийся и напрягающие цементы и самонапряженные конструкции / В. В. Михайлов, С. Л. Литвер. – М.: Стройиздат, 1974. – 312 с.
2. Бетонные и железобетонные конструкции из напрягающего бетона: ТКП 45-5.03-158-2009 / Министерство архитектуры и строительства РБ. – Минск: Минстройархитектуры, 2010. – 28 с.
3. Бетоны напрягающие. Технические условия: СТБ 2101 – 2010. – Введ. 28.07.2010. – Минск: РУП “Стройтехнорм”, 2010. – 19 с.
4. 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.
5. Ishikava, Y. Initial stress analysis of expansive material under restrictions based on chemical conservation law / Y. Ishikava, K. Shibata, T. Tanabe // Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures. – London, 2009. – P. 437–443.
6. Михайлов, В. В. Плоские самонапряженные конструкции / В. В. Михайлов, В. С. Гершвальд // Исследования и применение напрягающего бетона и самонапряженных конструкций: сб. тр. / НИИЖБ; под науч. ред. В. В. Михайлова. – Москва, 1984. – С. 62–67.

7. 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 с.
8. Литвер, С. Л. Самонапряжение при двухосном ограничении деформаций расширения / С. Л. Литвер, А. И. Петухов // Исследования и применение напрягающего бетона и самонапряженных конструкций: сб. тр. / НИИЖБ; под науч. ред. В. В. Михайлова. – Москва, 1984. – С. 67–68.
9. Man, T. Expansion behavior of self-stressing concrete confined by glass-fiber composite meshes / T. Man, T. B. Wang, H. Jin, X. Zhang // Construction and building materials, 2016. – № 128. – P. 38–46.
10. Okada, K. Characteristics of expansive concrete under bi-axial restraint / K. Okada K, M. Ohta, T. Nagafuchi, A. Yata, S. Tamai // Journal of the society of material science. – Japan. – 1983. – Volume 32. – P. 182–187.
11. Ito, H. Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete / H. Ito [et. al] // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2004. – Vol. 2, № 2. – P. 155–174.
12. Semianiuk, V. Early age strain and self-stresses of expansive concrete members under uniaxial restraint conditions / V. Semianiuk, V. Tur, M. F. Herrador, G. M. Paredes // Construction and building materials. – 2017. – № 131. – С. 39–49.
13. Sannikava, V. Estimation of the restrained strains and self-stresses under two-way restraint conditions / V. Sannikava, V. Tur // Journal of sustainable architecture and civil engineering. – 2017. – Vol. 29, No 3. – P. 75–86. Doi: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.sace.20.3.19082>.

References

1. Mihajlov, V. V. Rasshiryayushchiysya i napryagayushchie cementy i samonapryazhennye konstrukcii / V. V. Mihajlov, S. L. Litver. – M.: Strojizdat, 1974. – 312 s.
2. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstrukcii iz napryagayushchego betona: TKP 45-5.03-158-2009 / Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva RB. – Minsk: Minstrojarhitektury, 2010. – 28 s.
3. Betonny napryagayushchie. Tekhnicheskije usloviya: STB 2101 – 2010. – Vved. 28.07.2010. – Minsk: RUP “Strojtekhnorm”, 2010. – 19 s.
4. 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.
5. Ishikava, Y. Initial stress analysis of expansive material under restrictions based on chemical conservation law / Y. Ishikava, K. Shibata, T. Tanabe // Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures. – London, 2009. – P. 437–443.
6. Mihajlov, V. V. Ploskie samonapryazhennye konstrukcii / V. V. Mihajlov, V. S. Gershval'd // Issledovaniya i primeneniye napryagayushchego betona i samonapryazhennykh konstrukcij: sb. tr. / NIIZHB; pod nauch. red. V. V. Mihajlova. – Moskva, 1984. – S. 62–67.
7. Marchuk, V. A. Deformacii i sobstvennyye napryazheniya nesimmetrichno dnuhosno armirovannykh ploskikh elementov iz napryagayushchego betona na stadii ego rasshireniya: dis. ... kand. tekhn. nauk 05.23.01 / V. A. Marchuk. – Brest, 2002. – 176 s.
8. Litver, S. L. Samonapryazhenie pri dnuhosnom ogranichenii deformacij rasshireniya / S. L. Litver, A. I. Petuhov // Issledovaniya i primeneniye napryagayushchego betona i samonapryazhennykh konstrukcij: sb. tr. / NIIZHB; pod nauch. red. V. V. Mihajlova. – Moskva, 1984. – S. 67–68.
9. Man, T. Expansion behavior of self-stressing concrete confined by glass-fiber composite meshes / T. Man, T. B. Wang, H. Jin, X. Zhang // Construction and building materials, 2016. – № 128. – P. 38–46.
10. Okada, K. Characteristics of expansive concrete under biaxial restraint / K. Okada K, M. Ohta, T. Nagafuchi, A. Yata, S. Tamai // Journal of the society of material science, Japan, 1983. – Volume 32. – P. 182–187.
11. Ito, H. Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete / H. Ito [et. al] // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2004. – Vol. 2, № 2. – P. 155–174.
12. Semianiuk, V. Early age strain and self-stresses of expansive concrete members under uniaxial restraint conditions / V. Semianiuk, V. Tur, M. F. Herrador, G. M. Paredes // Construction and building materials. – 2017. – № 131. – С. 39–49.
13. Sannikava, V. Estimation of the restrained strains and self-stresses under two-way restraint conditions / V. Sannikava, V. Tur // Journal of sustainable architecture and civil engineering. – 2017. – Vol. 29, No 3. – P. 75–86. Doi: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.sace.20.3.19082>.