

УДК 624.012.4.046

ГАПШЕНКО В.С., ЕНЬКОВ Е.У., КОРНЫЛО И.М.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ПРОЧНОСТЬ ПОЛОС БЕТОНА И РАБОТА АРМАТУРЫ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ДИСКОВ С ТРЕЩИНАМИ

Цель. Определение влияния напряженного состояния и ориентации арматуры относительно трещин на прочность железобетонных дисков. Уточнение зависимостей, определяющих коэффициенты В.И. Мурашева.

Методика. Аналитический обзор массива экспериментальных исследований ОГАСА и других авторов, в том числе и зарубежных, позволяющий сравнивать полученные данные испытаний образцов при сложном напряженном состоянии.

Результаты. В работе исследовано влияние сжимающих напряжений на деформативность железобетонных дисков и среднее деформации арматуры.

Научная новизна. Установлен факт существенного влияния сжимающих напряжений на деформативность железобетонных дисков. Введение в формулу, определяющую коэффициенты В.И. Мурашева ψ_{SI} функции φ_{ps} учитывающей влияние поперечного обжатия, позволило более точно определить среднее деформации арматуры.

Практическая значимость. Выявлено, что сжимающее напряжение заметно увеличивают деформативность дисков перпендикулярно трещинам. Этот факт необходимо учитывать для обеспечения надежности при проектировании конструкций. Прочность полос бетона между трещинами снижается с увеличением растягивающих напряжений, причем действующие нормы занижают прочность в разделе расчета на действие поперечной силы – возможна экономия бетона.

Ключевые слова. Железобетонные диски, плоское напряженное состояние, полосы бетона, углы наклона арматуры, напряжения, деформации, прочность.

Введение. В плосконапряженных сжато-растянутых железобетонных элементах с наклонными трещинами можно выделить два типа разрушения:

- а) в результате разрыва арматуры в трещинах;
- б) от разрушения полос между трещинами.

Оба случая имеют место при исчерпании несущей способности балок-стенок, опорных и угловых зон широких рам типа порталных, и, даже в опорных зонах обычных балок [1].

Известно, что характер диаграммы растяжения железобетонного стержня существенно отличается от зависимости $E_s - \sigma_s$ свободной арматуры. Влияние растянутого бетона между трещинами на средние деформации арматуры по предложению В.И. Мурашева учитывается при помощи коэффициента $\psi_s < 1$ путём повышения среднего модуля деформации:

$$E_s^* = E_s / \psi_s,$$

Постановка задачи. Настоящая статья является продолжением работы [9]. Учитывая результаты исследований [1-8], где разработаны теоретические и экспериментальные аспекты изысканий, предлагается усовершенствование методики расчета железобетонных дисков с трещинами, позволяющей определять напряженно-деформированное состояние при действии кратковременной и длительной нагрузки высокого уровня.

Результаты исследований. В работе [8] относительную прочность полос бетона между трещинами в зависимости от суммы средних деформаций железобетонного элемента в двух взаимоперпендикулярных направлениях на основе опытных данных [3] рекомендуется определять по формуле:

$$\frac{R_n}{R_B} = \frac{14,5}{\varepsilon_{sn} 10^3 + 10} - 0,45 \quad (1)$$

По этой формуле при больших значениях деформациях арматуры ε_{sn} прочность полос бетона получается отрицательной.

В результате обработки экспериментальных данных [3] по методу наименьших квадратов предлагается относительную прочность полос бетона аппроксимировать зависимостью:

$$y = \frac{a}{bx + c},$$

что исключает отмеченное противоречие.

В окончательном виде после «сглаживания» функцией $f = k/x$ предложена зависимость:

$$\frac{R_n}{R_B} = \frac{4,88}{\varepsilon_{sn} 10^3 + 4,88} - 0,45 \quad (2)$$

среднеквадратическое отклонение составило $\sigma^2 = 1,58$ при коэффициенте вариации $v = 0,034$.

В результате испытания дисков [4] полученные экспериментальные данные, позволяющие определить относительную прочность полос бетона между трещинами по формуле:

$$\frac{R_n}{R_B} = \frac{8,293}{\varepsilon_{sn} 10^3 + 8,293} = \frac{1}{0,12\varepsilon_{sn} 10^3 + 1} \quad (3)$$

среднеквадратическое отклонение составило $\sigma^2 = 1,25$ при коэффициенте вариации $v = 0,02$.

После обработки совокупности данных [3, 4] получено:

$$\frac{R_n}{R_B} = \frac{5,42}{\varepsilon_{sn} 10^3 + 5,42} = \frac{1}{0,18\varepsilon_{sn} 10^3 + 0,9} \quad (4)$$

среднеквадратическое отклонение $\sigma^2 = 1,35$; коэффициент вариации $v = 0,193$.

Такой значительный разброс опытных данных можно отнести на счет использования различных методик испытания, размеров образцов и физико-механических характеристик бетона и арматуры.

Если перейти от деформации ε_{sn} к напряжениям, то формула (4) принимает вид:

$$\frac{R_n}{R_B} = \frac{5,42}{10^{-3} \left(\frac{\lambda_x}{\mu_{sx}} + \frac{\lambda_y}{\mu_{sy}} \right) (\sigma_n - 0,7f_{cж} \sigma_{bcf}) + 1} \leq 1$$

σ_{bcf} напряжение в бетоне в момент образования трещин;

$$f_{cж} = 1 + 1,2\eta_c(1 - \eta_c), \eta_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{bcf}}, \sigma_{bcf} = R_{bt,ser}$$

$$\lambda_x = \frac{n}{n\mu_{sx} + \mu_{sy}ctg^2\alpha}; \quad \lambda_y = \frac{\mu_{sy}n}{n\mu_{sy} + \mu_{sx}tg^2\alpha}$$

$\mu_x; \mu_y$ коэффициенты армирования

Из разных опытов $16 \leq n \leq 25$

При $\alpha=45^\circ$ $\lambda_x \approx \lambda_y \approx 1$

При $\alpha=90^\circ$ $\lambda_x \approx 1$; $\lambda_y \approx 0$

Анализ результатов экспериментальных данных показал, что прочность полос бетона существенно зависит от средних деформаций железобетонного элемента в направлениях перпендикулярных трещинам; если в арматуре обоих направлений нет текучести, то для дисков $\alpha = 90^\circ$ в среднем $R_n = 0,82R_s$; при

$\alpha = 45^\circ$ $R_n = 0,615R_s$ (для опытов [3, 4] $R_n = 0,67R_s$)

При текучести арматуры только одного направления $R_n = 0,40R_s$

При текучести арматуры обоих направлений к моменту разрушения $R_n = 0,29R_s$

В опытах, проведенных в ОГАСА, текучести арматуры не было из-за предварительного упрочнения стали вытяжкой.

В условиях плоского напряженного состояния железобетона при ортогональном армировании в направлениях $i = x, y$ работа арматуры в наклонных трещинах на сдвиг может быть учтена посредством введения корректирующих коэффициентов λ_i (5,7,10,12). Эти исследования проводились на растянутых образцах – дисках и показали, что величину коэффициентов ψ_{SI} можно определить по формуле:

$$\psi_{SI} = 1 - 0,75 \frac{R_{bt} \lambda_{crc}}{\sigma_{n\lambda_i}} = 1 - 0,75 \frac{\lambda_{crc}}{\lambda_i} \cdot \frac{1}{\eta_n^\sigma} \quad (5)$$

где: λ_{crc} - величина коэффициента λ_i в момент трещинообразования,

$$\lambda_{crc} = \max(\lambda_{i,crc}) > 0,6$$

$\eta_n^\sigma = \sigma_n / R_{bt}$ - уровень растягивающих напряжений.

В случае более сложного плоского напряженного состояния «растяжение - сжатие», рекомендации по определению ψ_{SI} не согласуются у разных авторов (6,9).

Предлагаемая методика обработки экспериментальных данных (6,9), а также полученных при испытании железобетонных дисков (11) 30*30*7 см, позволила уточнить формулу (5) для вычисления ψ_{SI} в условиях растяжения в направлении оси n и сжатия в направлении оси l .

Для образцов с углом наклона трещин к арматурным стержням $\alpha = 90^\circ$ ($x = n$), средние относительные деформации железобетона в направлении усилия растяжения n :

$$E_n = C_n \sigma_1 + C_{nl} \sigma_l \quad (6)$$

$$\text{где: } C_n = \frac{\psi_{sx} \lambda_x}{\mu_{sx} E_{sx}}; C_{nl} = -\mu_b C_l; C_{nl} = -\mu_b C_l, C_l = \frac{1}{E_b \nu_b},$$

при чём μ_b - коэффициент Пуассона ν_b - коэффициент, учитывающий пластические деформации бетона при загрузении; σ_n и σ_l - растягивающие и сжимающие напряжение.

Выражение для ψ_{sx} , можно записать, используя (6), в виде:

$$\psi_{SI} = 1 - 0,75 \phi_{ps} \frac{R_{bt} \lambda_{crc}}{\sigma_{sx} \mu_{sx}} \quad (7)$$

Обозначив,

$$A_0 = 0,75 \frac{R_{bt} \lambda_{crc}}{\sigma_{sx} \mu_{sx}} \quad (8)$$

получим выражение для определения коэффициента ϕ_{ps} , учитывающего поперечное обжатие:

$$\phi_{ps} = (1 - \psi_{sx})/A_0 \quad (9)$$

Если подсчитывать A_0 и ψ_{sx} , используя формулы (5,6) для образцов из опытов без поперечного обжатия ($\sigma_1 = 0$), то значения ϕ_{ps} в растянуто-сжатых образцах можно определить по (9), подставляя величины ψ_{sx} из (6) при σ_1 не равно 0.

$$\phi_{ps} = \left[1 - \frac{(\varepsilon_n - \mu_b |\sigma_1| / E_b \nu_b) \mu_{sx} E_{sx}}{k \lambda_x \sigma_n} \right] / A_0 \quad (10)$$

где: $k=1,0$ при $\alpha=90^\circ$ и $k=2,0$ при $\alpha=45^\circ$.

Анализ показывает, что функция ϕ_{ps} не зависит от угла α и её можно с достаточной степенью точности описать полиномом второй степени (коэффициент вариации $v = 0,23$):

$$\phi_{ps} = 1 + 1,2\eta_f^2(1 - 2\eta_f^2) \quad (11)$$

где η_f^2 – уровень поперечного обжатия:

$$\eta_f^2 = |\sigma_1|/R_b$$

Функция ϕ_{ps} может быть также выражена через уровень относительных деформаций

$$\eta_f^2 = \varepsilon_1/\varepsilon_u, \text{ где } \varepsilon_u = 200 \cdot 10^{-5} \text{ предельная деформация сжатого бетона.}$$

В результате обработки экспериментальных данных предложена зависимость:

$$\phi_{ps} = 1 + 1,4\eta_f^2(1 - 3\eta_f^2) \quad (12)$$

Т.к. имеющиеся экспериментальные данные ограничены диапазоном $0,06 \leq \eta_f^2 \leq 0,75$, то рекомендуется принимать $0,5 \leq \phi_{ps}$.

Изменение ψ_{si} во времени может быть учтено введением в формулу (7) коэффициента длительности нагрузки $\varphi_{is,i}$:

$$\psi_{si} = 1 - 0,75\varphi_{is,i}\varphi_{ps}\lambda_{i,crc}/(\eta_n^2\lambda_i), \quad (13)$$

где:

$$\phi_{s,i} = 1 - \frac{3\phi_{si}}{3 + 2\phi_{si}(2 + \Omega(t_0))} \quad (14)$$

$$\phi_{si} = \frac{2\mu_{si}\alpha_E}{1 + 2\mu_{si}\alpha_E} \phi(t, t_0) \quad (15)$$

при чём, $\phi(t, t_0)$ - характеристика ползучести;

$\Omega(t_0)$ - функция, учитывающая влияние старения бетона.

Значение функции φ_{is} представляют собой коэффициенты затухания напряжений в растянутой зоне бетона в сечении между трещинами, а приведенные формулы являются по сути дела, упрощенным вариантом зависимостей, предложенных И.Е. Прокоповичем.

Таким образом, выявлено влияние ориентации арматурных стержней, поперечного обжатия и длительности действия постоянной нагрузки на величину коэффициентов ψ_{si} ($i=x,y$).

Сопоставление вычисленных по предлагаемой методике средних деформаций арматуры и деформаций в трещине с экспериментальными данными разных авторов показало вполне удовлетворительное соответствие.

Выводы. Сжимающие напряжения существенно влияют на деформативность железобетонных дисков с трещинами в направлении растяжения. При невысоких уровнях несколько улучшают работу элемента (уменьшают деформации), при уровнях $\eta_t^c > 0,5$ – существенно увеличивают эти деформации.

Введение в формулу, определяющую коэффициенты *В.И. Мурашева* ψ_{SI} функции φ_{ps} , учитывающей влияние поперечного обжатия, позволило более точно определить средние деформации арматуры. Об свидетельствует соответствие деформаций полученных теоретически экспериментальным данных различных авторов и других исследований.

Література

1. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами / Н.И. Карпенко. – М. Стройиздат, 1976. – 204 с.
2. Григорьянц Л.М. Экспериментальное исследование напряженного состояния арматуры и бетона при наличии наклонных трещин / Л.М. Григорьянц. – В кн.: Строительные конструкции, здания и сооружения, ЦНИИЭПсельстрой, вып.17. – М., 1977. – с. 38-67.
3. Гусейнов Н.А. Исследование деформаций и прочности железобетонных элементов с трещинами при напряженном состоянии «растяжение-сжатие» / Н.А. Гусейнов. – В кн.: Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных конструкций / НИИЖБ. – М.: 1979. – с. 44-57.
4. Еньков Е.У. Физические зависимости плосконапряженного состояния железобетона с трещинами в условиях ползучести и экспериментальное обоснование соответствующих параметров / Е.У. Еньков. – В сб.: Строительные конструкции. – К., Будівельник, 1979, вып. 32. – с.54-57.
5. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
6. Яременко А.Ф. Длительное деформирование железобетонных дисков с трещинами / А.Ф. Яременко, А.Я. Мельник. – В сб.: Строительные конструкции. – К., Будівельник, 1979, вып. 35. – с.40-44.
7. Мельник А.Я. Распределение напряжений в арматуре железобетонных дисков с трещинами / А.Я. Мельник. – Изв. Вузов. Сер. Стр-во и архит. 1980, №10. – с. 16-19.
8. Яременко А.Ф. Кратковременная и длительная прочность растянуто-сжатых дисков с трещинами / А.Ф. Яременко, В.С. Гапшенко. – Бетон и железобетон, 1986, №12. – с. 23-24.
9. Яременко А.Ф. Параметры физических зависимостей железобетона с трещинами / А.Ф. Яременко, В.С. Гапшенко, Е.У. Еньков. – У зб. Вісник ОДАБА. – Одеса, Місто майстрів, 2000, вип. 1. – с. 6-8.

References

1. Karpenko, N.I. (1976) *Teoriya deformirovaniya zhelezobetona s treschinami*. M. Stroyizdat, 204 p.
2. Grigoryants, L.M. (1977) *Eksperimentalnoe issledovanie napryazhennogo sostoyaniya armatury i betona pri nalichii naklonnykh treschin*. Stroitelnyie konstruksii, zdaniya i sooruzheniya, TsNIIEPselstroy, vyip.17. p. 38-67.
3. Guseynov, N.A. (1979) *Issledovanie deformatsiy i prochnosti zhelezobetonnykh elementov s treschinami pri napryazhennom sostoyanii «rastyazhenie-szhatie»*. Prochnost, zhestkost i treschinostoykost zhelezobetonnykh konstruksiy.1979. p. 44-57.
4. Enkov, E.U. (1979) *Fizicheskie zavisimosti ploskonapryazhennogo sostoyaniya zhelezobetona s treschinami v usloviyah polzuchesti i eksperimentalnoe obosnovanie sootvetstvuyuschih parametrov*. Stroitelnyie konstruksii. K., BudIvelnik, p.54-57.
5. Karpenko, N.I. (1996) *Obschie modeli mehaniki zhelezobetona*. – M.: Stroyizdat. 416 p.
6. Yaremenko A.F., Melnik A.Ya., Dlitelnoe deformirovanie zhelezobetonnykh diskov s treschinami – V sb.: Stroitelnyie konstruksii – K., BudIvelnik, 1979, vyip. 35. – p.40-44.
7. Melnik, A.Ya. (1980) *Raspredelenie napryazheniy v armature zhelezobetonnykh diskov s treschinami*. Ser. Str-vo i arhit. 1980, v. 10. p. 16-19.
8. Yaremenko, A.F., Gapshenko, V.S. (1986) *Kratkovremennaya i dlitel'naya prochnost rastyanuto-szhatykh diskov s treschinami – Beton i zhelezobeton*, Vol. 12. p. 23-24.
9. Yaremenko, A.F., Gapshenko, V.S., Enkov, E.U. (2000) *Parametryi fizicheskikh zavisimostey zhelezobetona s treschinami*. Odesa, Misto maystriv», p. 6-8.

МІЦНІСТЬ СМУГ БЕТОНУ І РОБОТА АРМАТУРИ ПЛОСКОНАПРЯЖЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ДИСКІВ З ТРІЩИНАМИ

ГАПШЕНКО В.С., ЄНЬКОВ Є.У., КОРНИЛО І.М.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Мета. Визначення впливу напруженого стану і орієнтації арматури щодо тріщин на міцність залізобетонних дисків. Уточнення залежностей, що визначають коефіцієнти В. І. Мурашева.

Методика. Аналітичний огляд масиву експериментальних досліджень ОДАБА та інших авторів, у тому числі і зарубіжних, дозволяє порівнювати отримані дані випробувань зразків при складному напруженому стані.

Результати. У роботі досліджено вплив стискаючих напруг на деформативність залізобетонних дисків і середнє деформації арматури.

Наукова новизна. Встановлено факт істотного впливу стискаючих напруг на деформативність залізобетонних дисків. Введення у формулу, визначальну коефіцієнти В.І. Мурашева ψ_{SI} функції φ_{ps} , що враховує вплив поперечного обтиснення, дозволило більш точно визначити середнє деформації арматури.

Практична значимість. Виявлено, що стискаюче напруження помітно збільшують деформативність дисків перпендикулярно тріщин. Цей факт необхідно враховувати для забезпечення

надійності при проектуванні конструкцій. Міцність смуг бетону між тріщинами знижується із збільшенням розтягуючих напружень, причому діючі норми занижують міцність в розділі розрахунку на дію поперечної сили – можлива економія бетону.

Ключові слова. Залізобетонні диски, плоский напружений стан, смуги бетону, кути нахилу арматури, напруження, деформації, міцність.

THE STRENGTH OF BANDS OF CONCRETE AND REBAR REINFORCED CONCRETE PROKONOPACHENY DISCS WITH CRACKS

GAPSHENKO V.S., YENKOV E.U., KORNILYO I.M.

Odessa state Academy of construction and architecture

Purpose. Determination of the influence of stress state and orientation of the rebar relative to the cracking strength of reinforced concrete discs. Specification of the dependencies that define the coefficients VI Murasheva.

Methodology. Analytical review of experimental research of OGAS and other authors, including foreign ones, allowing to compare the obtained data of testing of samples under complex stressed state.

Results. The work investigated the influence of compressive stresses on the deformability of reinforced concrete discs and average strain of reinforcement.

Scientific novelty. The fact of significant influence of compressive stresses on the deformability of reinforced concrete discs. Introduction to the formula for determining the coefficients Murasheva V.I. ψ_{SI} function φ_{ps} , considering the influence of transverse compression, allowed us to more accurately determine the average strain of rebar.

Practical significance. It is revealed that the compressive stress significantly increases the deformability of the discs perpendicular to the cracks. This fact must be taken into account to ensure reliability for the design of structures. The strength of the strips of concrete between cracks decreases with increasing tensile stress, and the current norms understate the strength of the section based on the action of lateral forces – the possible economy of concrete.

Key words. Concrete drives, plane stress, the bands of concrete, the inclination angles of the reinforcement, stresses, deformation, strength.