

Є.Г. Стоянов, А.В. Набока

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ПОРІВНЯННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ ЗГИНАЮЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ДІЮ ПОПЕРЕЧНОЇ СИЛИ

Розглядаються різні моделі і відповідні їм методики розрахунку залізобетонних згинаючих елементів на дію поперечних сил, що дозволяють враховувати властивості матеріалів, вплив попереднього напруження, дії повздовжніх осьових стискаючих або розтягуючих сил.

Наводиться порівняння результатів практичного розрахунку балок на дію поперечної сили по розглянутим методикам.

Ключові слова: поперечна сила, стандарти, попередньо напружені елементи.

Постановка проблеми

В теперішній час в Україні основні положення розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій визначаються національними нормами [1], що базуються на нормах EN 1992-1-1-2004 [2].

Згідно з цими нормами, під час розрахунку згинаючих елементів на дію поперечної сили внесок бетону в опір дії поперечної сили враховується тільки при відсутності поперечної арматури, а при її наявності несуча здатність перетину визначається тільки опором цієї арматури з нехтуванням опору бетону.

Таке нехтування внеском бетону в опір дії поперечної сили часто суперечить методикам розрахунку, що прийняті багатьма зарубіжними нормами, а також досвіду проектування реальних конструкцій і даним експериментальних досліджень.

В переважній більшості сучасних норм прийнята «фермова» модель розрахунку на поперечну силу, хоча вона не може вважатися ідеальною і потребує вдосконалення.

Аналіз попередніх досліджень

У прийнятій американськими нормами АСІ 318-14 Code [3] моделі передбачається, що внесок бетону в опір зрізу (V_c) визначається як величина, пропорційна кореню квадратному циліндричної міцності бетону, а стисла частина бетону розглядається як деяке шпонкове з'єднання. Кут нахилу діагональної тріщини при руйнуванні елемента фіксований як 45° .

У вказаних нормах не враховуються такі фактори, як ширина розкриття і глибина тріщини, осьова жорсткість елемента, шорсткість бетону в тріщині, ефект від нерівномірного розподілу повздовжнього зусилля по перетину елемента (особливо для перетинів таврового профілю).

Тому вказана «базова» методика розрахунку постійно вдосконалюється і модифікується.

Так, у «базовій» методиці [3] внесок бетону в несучу здатність згинаючого елемента по поперечній силі (при відсутності попереднього напруження і осьової сили)

$$V_c = 2\lambda\sqrt{f'_c}b_wd. \quad (1)$$

В модифікованому варіанті (method detail) внесок бетону приймається як найменше зі значень [4]:

$$V_c = \lambda(1.9\sqrt{f'_c} + 2500\rho\frac{v_d}{M})b_wd \quad (2)$$

$$V_c = \lambda(1.9\sqrt{f'_c} + 2500\rho)b_wd, \quad (3)$$

$$V_c = 3.5\lambda\sqrt{f'_c}b_wd, \quad (4)$$

де

$\lambda = 1$ для важкого бетону; при переводі V_c в кН прийняти $\lambda = 0.0069$;

f'_c – розрахунковий опір бетону на стиск (psi);

$\rho = A_s/b_wd$ – коефіцієнт повздовжнього армування;

b_w – мінімальна товщина стінки балки (inch);

d – робоча висота балки (inch).

Подальша модернізація «базової» методики запропонована в [5], де внесок бетону в опір зрізу визначається за формулою

$$V_c = 2\sqrt{f'_c} \frac{2.25}{(1+1500\varepsilon_x)} \frac{50}{(38+s_x)} b_wd. \quad (5)$$

Тут показано, що опір бетону зрізу залежить від середньої деформації бетону ε_x та від кроку поперечної арматури s_x (ефект деформативності).

Величина ε_x визначається за формулою

$$\varepsilon_x = \frac{M/0.9d + V + 0.5N - A_p f_{se}}{2(A_s E_s + A_p E_p)}, \quad (6)$$

де

M, V – відповідно згинаючий момент і поперечна сила в розглянутому перетині;

N – повздовжня сила;

A_s, A_p – площі поперечних перетинів відповідно повздовжньої ненапруженої і напруженої арматури;

$A_p f_{se}$ – зусилля попереднього напруження;

E_s, E_p – відповідно модулі деформацій ненапруженої і напруженої арматури;

Якщо напруження в повздовжній арматурі не перевищують 60 ksi (414 МПа), то для більшості згинаючих елементів приймається

$$V_c = \frac{100}{38 + s_x} \sqrt{f_c'} b_w d, \quad (7)$$

а крок поперечної арматури можна прийняти постійним, рекомендованим як $s_x = 12 \text{ inch} = 30.5 \text{ см}$.

Для елементів з поперечною арматурою кут нахилу тріщини визначається за формулою

$$\theta = 29^\circ + 7000\varepsilon_x, \quad (8)$$

де ε_x визначається по (6).

Вклад поперечної арматури в опір зрізу

$$V_s = 0.9 A_v f_{yt} d \cdot \text{ctg} \theta / s_x, \quad (9)$$

де

A_v – площа поперечного перетину поперечної арматури;

f_{yt} – розрахунковий опір поперечної арматури.

В методиці, заснованій на Multi-Action model [6], пропонується рішення де внесок бетону в опір зрізу уточнюється в залежності від розміру стиснутої полки перетину, а модель руйнування характеризується двома гілками: головною діагонально $a-b$, що проходить від нижньої грані балки до нейтральної осі, і розвивається по другій гілці $b-c$ в стислій зоні під другим кутом, де бетон працює на відрив (рис. 1).

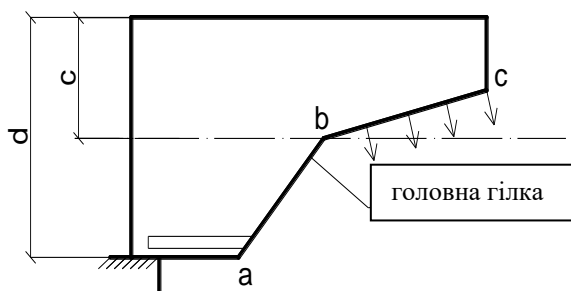


Рис. 1. Характер руйнування елемента від дії поперечної сили

Несуча здатність елемента $V_u = V_c + V_s$, де внесок бетону

$$V_c = 6\lambda \xi \frac{c}{d} \sqrt{f_c'} b_{w \text{ eff}} d, \quad (10)$$

де

$b_{w \text{ eff}}$ – ефективна ширина стиснутої полки балки таврового перетину;

ξ – фактор розміру і гнучкості, що визначається за формулою

$$\xi = \frac{2}{\sqrt{1 + d_0/s}} \left(\frac{d}{a}\right)^{0.2}, \quad (11)$$

$d_0 = d \leq 4 \text{ inch}$;

s – шаг поперечної арматури;

$a = M/V$; для балок довжиною L с $L/d \leq 17.5$ приймають $d/a = 1/3.5$;

c – висота стиснутої зони бетону.

Величина c/d може бути отримана з аналізу тріщиноутворення при чистому вигині.

Також в практичних розрахунках можна приймати c/d що дорівнює:

0.2 – для слабо армованих елементів,

0.25 – при середньому армуванні,

0.35 – при посиленому армуванні.

Кут нахилу тріщини по головній гілці визначається через

$$\text{tg} \theta = 0.85d / (d - c) \leq 2.5. \quad (12)$$

Вклад поперечної арматури

$$V_s = 1.2 A_v f_{yt} / s. \quad (13)$$

В [7] пропонується деякий уніфікований підхід к рішення міцності згинаючих елементів на зріз.

Несуча здатність перетину $V_u = V_c + V_s$, де внесок бетону

$$V_c = 5\lambda \sqrt{f_c'} b_w c y_d, \quad (14)$$

$$c = d \sqrt{(\rho n)^2 + 2\rho n} - \rho n, \quad (15)$$

$$\rho = A_s / b_w d; n = E_s / E_c; \quad (16)$$

$$y_d = \frac{1.4}{\sqrt{1 + d/d_0}}. \quad (17)$$

В формулі (17) приймають:

$d_0 = 100 \text{ inch}$, якщо $A_v \geq A_{v \text{ min}}$; $y_d = 1$, якщо $d < 10 \text{ inch}$.

Внесок поперечної арматури

$$V_s = A_v f_{yt} d / s. \quad (18)$$

Межа міцності на зріз обмежується умовами:

$$V_u \leq 0.75(V_c + 8\sqrt{f_c'} b_w d); V_u \leq 4V_c. \quad (19)$$

Запропонована методика може бути застосована до звичайних і попередньо напружених елементів, з поперечною арматурою і без неї, до елементів із полімербетону і полімерарматури.

Автори [8] приймають внесок бетону в опір зрізу як величину, пропорційну висоті неруйнівної стиснутої зони бетону c і відношенні «проліт-зріз» до міцності на згин у ступені 0.7 (розпірна концепція). Ця концепція прийнята Joint ACI – ASSE Committee 446 Fracture Mechanics of Concrete.

Несуча здатність перетину по поперечній силі $V_u = V_c + V_s$,

де

$$V_c = 17\lambda \left(\frac{V}{M}\right)^{0.7} \sqrt{f_c^I} b_w c \frac{1}{\sqrt{1+h/11.8}}; \quad (20)$$

c визначається по (15);

h – висота елемента.

Внесок поперечної арматури V_s визначається по (18).

В [9] механізм руйнування при дії поперечної сили також розглядається як двохгілковий (рис. 1).

Величина внеску бетону в несучу здатність по поперечній силі

$$V_c = K_s f_t b_w c \operatorname{ctg} \theta, \quad (21)$$

де

K_s – коефіцієнт, що залежить від висоти елемента:

$$K_s = \left(\frac{12}{d}\right)^{0.25} \leq 1.1 \quad (d - \text{в } inch); \quad (22)$$

f_t – розрахунковий опір бетону на розтягнення, що приймається рівним

$$f_t = 2.2\lambda \sqrt{f_c^I} \quad (f_c^I - \text{в } psi), \quad (23)$$

c – висота стиснутої зони, що визначається по (15);

$$\operatorname{ctg} \theta = \frac{\sqrt{f_t(f_t + \sigma_{ct})}}{f_t}, \quad (24)$$

σ_{ct} – середні нормальні напруження від згинаючого моменту.

Внесок поперечної арматури визначається по (18).

Уточнена методика визначення внеску V_c в міцність елемента на зріз запропонована в [10] (Німеччина).

Автори вважають, що вклад бетону в несучу здатність елемента на зріз різний при наявності поперечної арматури (V_c) і при її відсутності (V_{ct}).

А. При наявності поперечної арматури

$$V_c = 0.066 f_{cwu} b_w z, \quad (25)$$

де розрахунковий опір бетону стиснутої зони при роботі на поперечну силу приймається як

$$f_{cwu} = 0.7 f_c^I; \quad (26)$$

кут θ обмежується умовами:

$$1 \leq \operatorname{ctg} \theta = \frac{\operatorname{ctg} \beta_2}{(1 - V_c/V_u)} \leq 3, \quad (27)$$

$$z = 0.9 d;$$

$$V_u = V_c + V_s; \quad V_{u \max} = b_w z f_{cwu} / (\operatorname{ctg} \theta + \operatorname{tg} \theta); \quad (28)$$

$$\operatorname{ctg} \beta_2 = 1.2 - 1.4 \sigma_c / f_c^I; \quad (29)$$

$\sigma_c = N/A_c$ – середнє напруження в балці від поздовжньої сили N або від попереднього напруження.

Вклад поперечної арматури

$$V_s = A_v f_{yt} z \operatorname{ctg} \theta / s. \quad (30)$$

Б. При відсутності поперечної арматури

Несуча здатність бетону

$$V_{ct} = (71^3 \sqrt{\frac{\rho f_c^I}{d}} - 0.23 \sigma_c) b_w d, \quad (31)$$

при відсутності повздовжньої сили

$$V_{ct} = 71^3 \sqrt{\frac{\rho f_c^I}{d}} b_w d. \quad (32)$$

Автори [11] вважають, що при проектуванні згинаючих елементів за нормам [1] для нормальних вимог експлуатації залізобетонних конструкцій (без форс-мажорних ситуацій) можливо визначити несучу здатність згинаючих елементів на зріз по сумі двох складових – опір бетону ($V_{Rd,c}$) і опір поперечної арматури ($V_{Rd,s}$), що підтверджується і іншими авторами, а також натурними експериментами.

Формулювання мети статті

Визначення найбільш раціонального шляху визначення несучої здатності згинаючих елементів на дію поперечних сил.

Виклад основного матеріалу

Порівняння результатів розрахунку міцності згинаючого елемента за розмірними методиками.

Нижче в табл. 1 приводяться результати розрахунків міцності згинаючих елементів без попереднього напруження на дію поперечної сили за описаними методиками.

Розглядається залізобетонна балка прольотом $L = 6$ м, виконана з бетону класу C25/30, армування

повздожньою арматурою 2Ø25A400C ($A_s = 9.82 \text{ см}^2$), поперечною арматурою 2Ø8A400C ($A_{sw} = A_v = 1.01 \text{ см}^2$) с шагом $s = s_x = 30 \text{ см} = 12 \text{ inch}$. Розрахунок зусиль: $M = 120 \text{ кНм}$; $V_{Ed} = 80 \text{ кН}$.
Розрахункові характеристики:

$f_{ck, cub} = 30 \text{ МПа}$; $f_{ck, cyl} = 25 \text{ МПа} = 3625 \text{ psi}$; $f_{cd} = f_c^I = 17 \text{ МПа} = 2465 \text{ psi}$.
Робоча висота перетину $d = 46 \text{ см} = 18.11 \text{ inch}$;
ширина перетину $b = b_w = 20 \text{ см} = 7.87 \text{ inch}$.
Результати розрахунку приведені у табл.1.

Таблиця 1

Результати визначення несучої здатності балки

Методика розрахунку	Міцність бетону V_c , кН	Міцність попер. арм. V_s , кН	Несуча здатність $V_u = V_c + V_s$, кН
ДБН В.2.6-98:2009 [1], EN 1992-1-1 (Eurocode 2) [2]	-	119.2	119.2
ACI 318-14 («базова») [3]	97.7	67.8	165.5
ACI 318-14 [4] (уточнена, США)	101.7	67.8	169.5
ACI 318-14 [5] (модифікація, Канада)	107.5	62.9	170.4
Multi-Action Model [6] (Іспанія)	98.6	52.1	150.7
ACI 318-14 [7] (Уніфікований підхід, США)	114.0	43.4	157.4
«Розмірна модель» [8] (США, Тайвань)	83.8	43.4	127.2
Уніфіковане рішення [9] (Південна Корея)	71.4	43.4	114.8
ACI 318-14 [10] (Модифікація, Німеччина)	100.8	93.6	194.4
	89.7	-	89.7
ДБН В.2.6-98:2009, (практичний розрахунок) [11]	67.2	99.3	166.5

Автори не проводять порівняння з результатами розрахунків по нормам Росії (СНиП 52-01-2003:СП 63.13330-2012) і Білорусі (СНБ 5.03.01-02). Такі порівняння були виконані раніше [12].

Висновки

Із порівняння результатів розрахунку видно, що найбільш близькі результати теоретичного значення міцності згинаючого елемента по поперечній силі, визначені за різними модифікаціями ACI 318-14.

В запропонованому практичному розрахунку [11] при загальній несучій здатності, доволі близькій до результатів, отриманим по модифікаціям норм ACI 318-14, внесок окремих компонентів (V_c і V_s) відрізняються в сторону збільшення несучої здатності поперечної арматури і зменшення внеску бетону.

Література

1. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Текст] - Київ: Мінрегіонбуд України, 2009.
2. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2. Design of Concrete Structures. – Part 1-1. General rules and rules for buildings. – Brussels, 2004.
3. Belarbi, A. (2014) ACI 318-14. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute. – Farmington Hills.

4. Belarbi, A., Kuchma, D., Sanders, D. (2017) Proposals for New One-Way Shear Equations for the 318 Building Code. *Concrete International*, 39, 9, 29-32.
5. Bentz, E., Collins, M. (2017) Updating the ACI Shear Design Provisions. *Concrete International*, 39, 9, 33-38.
6. Cladera, A., Mari, A., Bairan, J-M., Oller, E., Ribas, C. (2017) One-Way Shear Design Method Based on a Multi-Action Model. *Concrete International*, 39, 9, 40-46.
7. Frosch, R., Yu, Q., Cusatis, G., Bazant, Z. (2017) A Unified Approach to Shear Design. *Concrete International*, 39, 9, 47-52.
8. Li, Y-A., Hsu, T., Hwang, S-J. (2017) Shear Strenght of Prestressed and Nonprestressed Concrete Beams. *Concrete International*, 39, 9, 53-57.
9. Park, H-G, Choi, K-K. (2017) Unified Shear Design Method of Concrete Beams Based on Compression Zone Failure Mechanism. *Concrete International*, 39, 9, 59-63.
10. Reineck, K-H (2017) Proposal for ACI 318 Shear Design. *Concrete International*, 39, 9, 65-70.
11. Бабаєв, В.М. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2). [Текст] / В.М. Бабаєв, А.М. Бамбура, О.М. Пустовойтова, П.А. Резнік, Є.Г. Стоянов, В.С. Шмуклер// Харків, «Золоті сторінки», 2015. – 206 с.
12. Коцюрубенко, О.Н. Анализ некоторых нормативных методов расчета железобетонных элементов на действие поперечной силы. [Текст] / О.Н. Коцюрубенко, Е.Н. Крайтовская // Вісник ОДАБА, вип. 58. – Одеса, 2017. - С. 197-207.

References

1. DBN B.2.6-98: 2009, Designs of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete constructions. Substantive provisions. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009.
2. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2. Design of Concrete Structures. – Part 1-1. General rules and rules for buildings. – Brussels, 2004.
3. Belarbi, A. (2014) ACI 318-14. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute. – Farmington Hills.
4. Belarbi, A., Kuchma, D., Sanders, D. (2017) Proposals for New One-Way Shear Equations for the 318 Building Code. *Concrete International*, 39, 9, 29-32.
5. Bentz, E., Collins, M. (2017) Updating the ACI Shear Design Provisions. *Concrete International*, 39, 9, 33-38.
6. Cladera, A., Mari, A., Bairan, J-M., Oller, E., Ribas, C. (2017) One-Way Shear Design Method Based on a Multi-Action Model. *Concrete International*, 39, 9, 40-46.
7. Frosch, R., Yu, Q., Cusatis, G., Bazant, Z. (2017) A Unified Approach to Shear Design. *Concrete International*, 39, 9, 47-52.
8. Li, Y-A., Hsu, T., Hwang, S-J. (2017) Shear Strength of Prestressed and Nonprestressed Concrete Beams. *Concrete International*, 39, 9, 53-57.
9. Park, H-G, Choi, K-K. (2017) Unified Shear Design Method of Concrete Beams Based on Compression Zone Failure Mechanism. *Concrete International*, 39, 9, 59-63.
10. Reineck, K-H (2017) Proposal for ACI 318 Shear Design. *Concrete International*, 39, 9, 65-70.
11. Babaiev, V. M., Bambura, A. M., Pustovoitova, O.M., Reznik, P.A., Stoianov, Ye.H., Shmukler, V. S. (2015) Practical calculation of elements of reinforced concrete structures for DBN B.2.6-98: 2009 in comparison with calculations under SNiP 2.03.01-84 * and EN 1992-1-1 (Eurocode 2). *Kharkiv, "Golden Pages"*, 206 .
12. Kotsiurubenko, O.N., Krantevska, Ye.N. (2017) Analysis of some standard methods for calculating reinforced concrete elements by the action of transverse force. *Bulletin of ODABA, issue 58*, 197-207.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри будівельних конструкцій В.С. Шмуклер, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

Автор: СТОЯНОВ Євген Геннадійович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – stoyanoveg@ukr.net

Автор: НАБОКА Анатолій Віталійович
кандидат технічних наук, асистент кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – anatoliinaboka@ukr.net

JUXTAPOSITION OF EXISTING MODIFIED METHODS FOR CALCULATION OF TRANSVERSE FORCE EFFECT ON BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

E. Stoyanov, A. Naboka

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

Various models and relevant methods of calculating transverse force effects on bending reinforced concrete elements have been considered, allowing to take into account the properties of materials, the effect of pre-stressing, the action of longitudinal axial compressive or tensile forces, as well as options for improving the basic calculation method have been studied. It is assumed that it is possible to disregard the contribution of concrete to the resistance to the action of transverse force with appropriate reinforcement, despite the contradiction between this assumption and international construction standards and calculation methods. The advantages of the calculation model adopted by the ACI standards (USA), and the options for its continuous improvement in connection with the neglect of some significant factors have been determined. The Multi-Action model is a part of this methodology, which allows to accurately determine the contribution of concrete to resistance, depending on the dimensions of the compressed section flange. Its application is of high relevance for conventional and pre-stressed elements, regardless of the reinforcement option. The ability to determine the bearing capacity of the bending elements against cut by the sum of the resistance of concrete and the resistance of transverse reinforcement is confirmed both theoretically and by in-situ experiments.

The results of the practical calculation of beams against the action of transverse force by the considered methods have been compared. In conclusion, relevant outcomes have been presented regarding the magnitude of the contribution of concrete compared with the bearing capacity of transverse reinforcement. Such results can lead to positive outcome for building companies and could be easily implemented by using these calculation methods.

Keywords: transverse force, construction standards, pre-stressed elements.