

ИЗЧИСЛИТЕЛНИ ПРОЦЕДУРИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРАВОЪГЪЛНИ СТОМАНОБЕТОННИ НАПРЕЧНИ СЕЧЕНИЯ С ЕДИНИЧНА АРМИРОВКА, ПОДЛОЖЕНИ НА ОГЪВАНЕ – РАВНОВЕСНА ЗАДАЧА

В. Михов¹, М. Трайкова²

Ключови думи: стоманобетон, огъване, изчислителни процедури

Научна област: стоманобетон и стоманобетонни конструкции

РЕЗЮМЕ

В статията се разглеждат основните стъпки при създаване на изчислителни процедури за изследване на стоманобетонни правоъгълни напречни сечения, подложени на огъване с единична армировка. Разработена е задачата за намиране на напрегнатото и деформирано състояние на сечението при дадено натоварване – равновесна задача. Дефинирани са основните случаи, като е направен подробен анализ на аналитичните решения. Разработен е числен пример в средата EXCEL.

1. Основни понятия

1.1. Работни диаграми на материала

За бетона се използва билинейна диаграма съгласно т. 3.1.4 на [2]:

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cd} \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c3}} & \text{при } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c3} \\ f_{cd} & \text{при } \varepsilon_{c3} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu3} \end{cases} \quad (1)$$

¹ Велислав Михов, асистент, УАСГ, кат. „Автоматизация на инженерния труд“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: vmixovz@mail.bg

² Марина Трайкова, проф. д-р инж., кат. „Масивни конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: marina5261@abv.bg

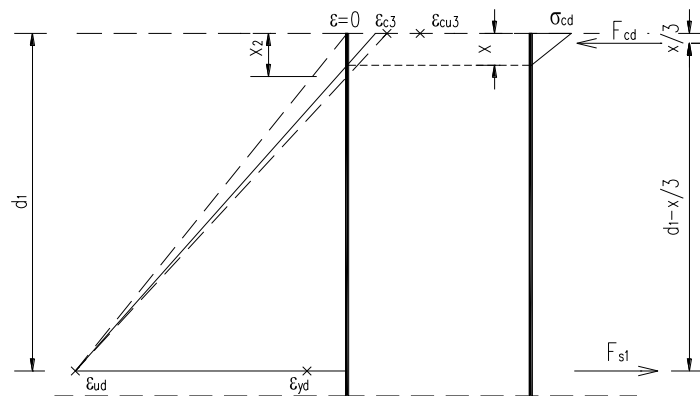
Стоманата се описва с билинейна диаграма с хоризонтален горен клон т. 3.2.7 на [2]:

$$\sigma_s = \begin{cases} \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{yd}} f_{yd} & \text{при } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{yd} \\ f_{yd} & \text{при } \varepsilon_{yd} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud} \end{cases} \quad (2)$$

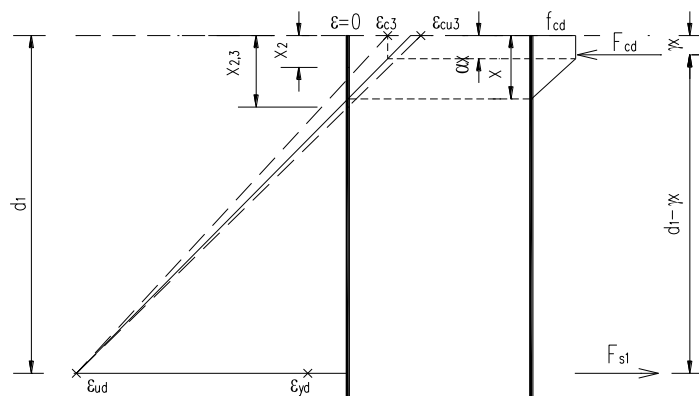
1.2. Случаи на деформирано състояние и гранични стойности на натисквата зона

За да има огъване, задължително в сечението трябва да има и опън, и натиск. От това следва, че чистото огъване е затворено в области 2, 3 и 4 на деформираното състояние на сечението. Може да се разграничат четири нови случая на деформирано състояние.

1 Случай: Той е част от област 2, при която $0 \leq \varepsilon_c < \varepsilon_{c3}$ и $\varepsilon_s = \varepsilon_{ud}$. Разрушението е от страна на опънната армировка. Напряженията са $\sigma_c < f_{cd}$ и $\sigma_s = f_{yd}$. Височината на натисквата зона се променя от 0 до x_2 . Диаграмата на напряжения в бетона е триъгълна.



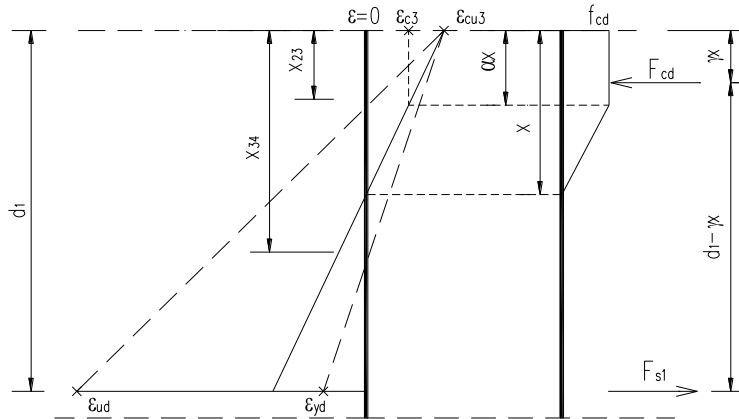
Фиг. 1. Случай 1



Фиг. 2. Случай 2

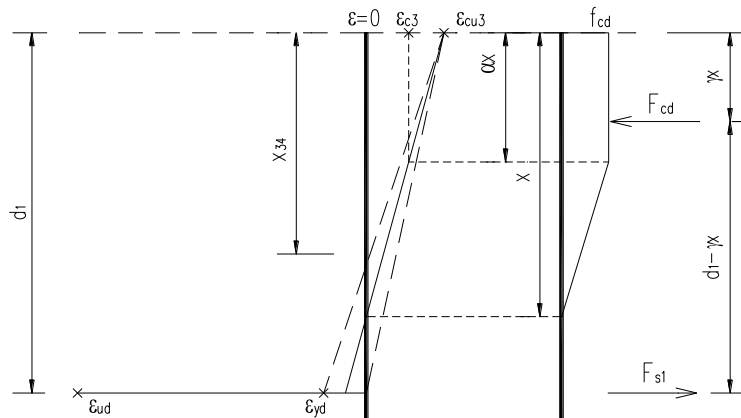
2 Случай: При него се покрива останалата част от област 2. Деформациите са $\epsilon_{c3} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu3}$ и $\epsilon_s = \epsilon_{ud}$, а напреженията са $\sigma_c = f_{cd}$ и $\sigma_s = f_{yd}$ – разрушение от страна на опънатата армировка. Височината на натисковата зона е x_2 а в края е x_{23} . Диаграмата на напреженията е трапецовидна.

3 Случай: Той обхваща област 3. Тук $\epsilon_c = \epsilon_{cu3}$ и $\epsilon_{ud} \geq \epsilon_s \geq \epsilon_{yd}$. Напреженията са $\sigma_c = f_{cd}$ и $\sigma_s = f_{yd}$. Разрушението е от страната на бетона. В началото височината на натискова зона е x_{34} , а в края е x_{34} . Диаграмата на напреженията е трапецовидна.



Фиг. 3. Случай 3

4 Случай: Той изцяло покрива област 4 от деформираното състояние на сечението. При него $\epsilon_c = \epsilon_{cu3}$ и $\epsilon_{yd} > \epsilon_s \geq 0$, а $\sigma_c = f_{cd}$ и $\sigma_s < f_{yd}$. Разрушението е изцяло при бетона в натисковата зона. Височината на натисковата зона варира от x_{34} до $x = d$. Работната диаграма на бетона е трапецовидна.



Фиг. 4. Случай 4

От диаграмите на деформираното състояние с помощта на подобни триъгълници за граничните стойности на височината на натисковата зона се получава:

$$x_2 = \frac{\epsilon_{c3}}{\epsilon_{c3} + \epsilon_{ud}} d_1, \quad (3)$$

$$x_{23} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{ud}} d_1, \quad (4)$$

$$x_{34} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} + \varepsilon_{yd}} d_1, \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{\alpha^2 + \alpha + 1}{3(\alpha + 1)}, \quad (6)$$

1.3. Основни уравнения

Равновесни уравнения:

$$\Sigma H = 0 \Rightarrow F_{s1} = F_{cd} \Rightarrow A_{s1} \sigma_{s1} = \frac{(\alpha + 1)}{2} \sigma_c \cdot xb, \quad (7)$$

$$\Sigma M_c = M_{Rd} \Rightarrow M_{Rd} = F_{s1} (d_1 - \gamma x) \Rightarrow M_{Rd} = A_{s1} \sigma_{s1} (d_1 - \gamma x), \quad (8)$$

$$\Sigma M_D = M_{Rd} \Rightarrow M_{Rd} = F_{cd} (d_1 - \gamma x) \Rightarrow M_{Rd} = \frac{(\alpha + 1)}{2} \sigma_c \cdot xb (d_1 - \gamma x). \quad (9)$$

Уравнение (8) е моментово уравнение за центъра на тежестта на нат. бетон, а (9) е моментово уравнение за центъра на опънната армировка. Уравнения (7), (8) и (9) са линейно зависими. При решението на задачата трябва да се използват само две от тях.

Геометрични уравнения. Получават се от подобни триъгълници.

$$\varepsilon_c = \frac{x}{d_1 - x} \varepsilon_{s1}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{d_1 - x}{x} \varepsilon_c, \quad (11)$$

$$\varepsilon_{c3} = \frac{(1 - \alpha)x}{d_1 - x} \varepsilon_{s1}, \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{x\alpha}{x} = \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_{c3})}{\varepsilon_c}. \quad (13)$$

Уравнения на физиката – вж. формули (1) и (2).

2. Равновесна задача: да се намерят напреженията и деформациите в бетона и армировката в стоманобетонно правоъгълно напречно сечение, натоварено на чисто огъване по направление на едната си ос при зададени данни за бетона, армировката, сечението и външното въздействие

Входни данни: За бетона f_{cd} , ε_{c3} , ε_{cu3} ; за армировката f_{yd} , E_s и ε_{yd} ; за сечението d_1 , b , A_{s1} и натоварването M_{Ed} .

Търси се: ε_c , σ_c , ε_{s1} и σ_{s1} .

Първо трябва да се решат 4 помощни задачи.

- **Задача 1** – $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c3}$ и $\varepsilon_{s1} \leq \varepsilon_{yd}$

Работната диаграма на бетона е триъгълна. При тази задача неизвестните са σ_c , σ_s , x , а $\alpha = 0$ и $\gamma = 1/3$. Получава се квадратно уравнение за x . Решението е:

$$x = \frac{-k_1 + \sqrt{k_1^2 + 4k_1 d_1}}{2}, \quad (14)$$

$$k_1 = \frac{2A_{s1} E_s \varepsilon_{c3}}{f_{cd} b}. \quad (15)$$

Останалите неизвестни се получават по формулите:

$$\sigma_c = \frac{2M_{Ed}}{xb \left(d_1 - \frac{1}{3}x \right)}, \quad \varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{f_{cd}} \varepsilon_{c3}, \quad \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{f_{cd}} \varepsilon_{c3}, \quad \varepsilon_{s1} = \frac{\sigma_{s1}}{E_s}. \quad (16)$$

- **Задача 2** – $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c3}$ и $\varepsilon_{yd} < \varepsilon_{s1} \leq \varepsilon_{ud}$

Работната диаграма на бетона е триъгълна. При тази задача неизвестните са σ_c и x , а $\sigma_{s1} = f_{yd}$, $\alpha = 0$ и $\gamma = 1/3$. В уравнение (8) неизвестното е само x .

$$x = 3 \left(d_1 - \frac{M_{Ed}}{A_{s1} f_{yd}} \right). \quad (17)$$

Останалите неизвестни се получават по формулите:

$$\sigma_c = \frac{2A_{s1} f_{yd}}{xb}, \quad \varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{f_{cd}} \varepsilon_{c3}, \quad \varepsilon_{s1} = \frac{d_1 - x}{x} \varepsilon_c. \quad (18)$$

- **Задача 3** – $\varepsilon_{c3} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu3}$ и $\varepsilon_{yd} < \varepsilon_{s1} \leq \varepsilon_{ud}$

Работната диаграма на бетона е трапецовидна. Неизвестните са x и α а $\sigma_{s1} = f_{yd}$ и $\sigma_c = f_{cd}$. Решението се получава от квадратно уравнение за x :

$$x = \frac{b_3 + \sqrt{b_3^2 - 4c_3}}{2}, \quad (19)$$

$$b_3 = \frac{A_{s1} f_{yd}}{2f_{cd} b}, \quad (20)$$

$$c_3 = \frac{A_{s1}^2 f_{yd}^2 + \frac{M_{Ed}}{A_{s1} f_{yd}} - 6f_{cd} b A_{s1} f_{yd} d_1}{4f_{cd}^2 b^2}. \quad (21)$$

Останалите неизвестни се получават по формулите:

$$\alpha = \frac{2f_{cd} x}{A_{s1} f_{yd}} - 1, \quad \varepsilon_{s1} = \frac{d_1 - x}{(1 - \alpha)x} \varepsilon_{c3}, \quad \varepsilon_c = \frac{x}{d_1 - x} \varepsilon_{s1}. \quad (22)$$

- **Задача 4** – $\varepsilon_{c3} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu3}$ и $\varepsilon_{s1} \leq \varepsilon_{yd}$

Работната диаграма на бетона е трапецовидна. Неизвестните са x , σ_{s1} и α , а $\sigma_c = f_{cd}$. Решение за x се получава след решение на уравнение от 4 степен:

$$x^4 + a_4 x^3 + b_4 x^2 + c_4 x + d_4 = 0, \quad (23)$$

$$a_4 = \frac{2A_{s1}E_s\varepsilon_{c3} - 2f_{cd}bd_1}{f_{cd}b}, \quad (24)$$

$$b_4 = \frac{4A_{s1}^2E_s^2\varepsilon_{c3}^2 + 24M_{Ed}f_{cd}b - 6A_{s1}E_s\varepsilon_{c3}f_{cd}bd_1}{3f_{cd}^2b^2}, \quad (25)$$

$$c_4 = \frac{24M_{Ed}A_{s1}E_s\varepsilon_{c3} - 8A_{s1}^2E_s^2\varepsilon_{c3}^2d_1 - 36M_{Ed}f_{cd}bd_1 - 18A_{s1}E_s\varepsilon_{c3}f_{cd}bd_1^2}{3f_{cd}^2b^2}, \quad (26)$$

$$d_4 = \frac{36M_{Ed}^2 + 4A_{s1}^2E_s^2\varepsilon_{c3}^2d_1^2 - 24M_{Ed}A_{s1}E_s\varepsilon_{c3}d_1 + 18A_{s1}E_s\varepsilon_{c3}f_{cd}bd_1^3}{3f_{cd}^2b^2}, \quad (27)$$

Решението, което има физически смисъл е:

$$x = 0.5 \left(\sqrt{2s-p} - \sqrt{(2s-p) - 4 \left(\frac{q}{2\sqrt{2s-p}} + s \right)} \right) - \frac{a_4}{4}, \quad (28)$$

$$s = (\alpha + \beta) + \frac{2p}{6}, \quad \alpha = \sqrt[3]{-0.5n + \sqrt{Q}}, \quad \beta = \sqrt[3]{-0.5n - \sqrt{Q}}, \quad (29)$$

$$Q = \left(\frac{m}{3} \right)^3 + \left(\frac{n}{2} \right)^2, \quad m = -r - \frac{p^2}{3}, \quad n = -\frac{2p^3}{27} - \frac{pr}{3} + \frac{4rp - q^2}{8}, \quad (30)$$

$$p = b_4 - \frac{3a_4^2}{8}, \quad q = \frac{a_4^3}{8} - \frac{a_4b_4}{2} + c_4, \quad r = -\frac{3a_4^4}{256} + \frac{a_4^2b_4}{16} + \frac{c_4a_4}{4} + d_4. \quad (31)$$

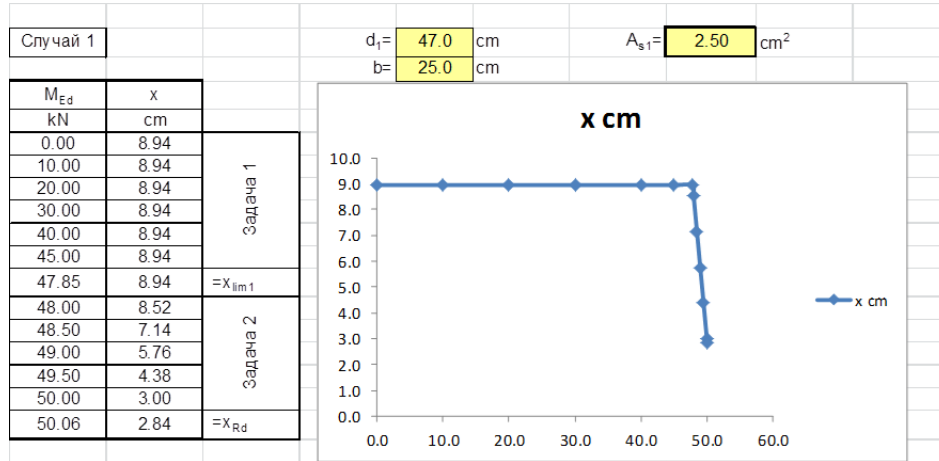
Останалите неизвестни се получават по формулите:

$$\alpha = \frac{6M_{Ed} - 2A_{s1}E_s\varepsilon_{c3}[d_1 - x] + f_{cd}bx(2x - 3d_1)}{f_{cd}bx(3d_1 - x)}, \quad \varepsilon_{s1} = \frac{d_1 - x}{(1 - \alpha)x} \varepsilon_{c3}, \quad (32)$$

$$\sigma_{s1} = \frac{(d_1 - x)}{x(1 - \alpha)} E_s \varepsilon_{c3}, \quad \varepsilon_c = \frac{x}{d_1 - x} \varepsilon_{s1}. \quad (33)$$

За да се реши основната задача трябва да се разгледа поведението на функцията $x(M_{Ed})$. Функцията е непрекъсната в дефиниционната си област. Началната стойност на функцията се получава при $M_{Ed} \Rightarrow 0$. Тогава $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c3}$ и $\varepsilon_{s1} \leq \varepsilon_{yd}$, следователно трябва да се реши **задача 1**. А при **задача 1** x не зависи от M_{Ed} . Ако x_{lim1} е стойността за x получена от решението на **задача 1**, то x_{lim1} е начална стойност на функцията $x(M_{Ed})$. Крайната стойност на функцията се получава при $M_{Ed} = M_{Rd}$ и се нарича x_{Rd} , което е височината на натисквата зона при решението на задачата за носимоспособност. Разгледайки поведението на функцията $x(M_{Ed})$ ще може да се установи кога коя от задачите от 1 до 4 трябва да ползваме. Разглеждат се по отделно четирите случаи на гранично равновесие.

➤ *Случай 1: $x_{Rd} \leq x_2$, $\epsilon_c \leq \epsilon_{c3}$ и $\epsilon_{s1} = \epsilon_{ud}$*



Фиг. 5. Графика на функцията $x(M_{Ed})$ при случай 1

Максималната стойност за M_{Ed} се получава при $x = x_{Rd}$, тогава $M_{Ed} = M_{Rd}$. Намалявайки плавно външния момент се излиза от граничното състояние. Диаграмата на деформациите се завъртва и приплъзва на долу. Деформациите ϵ_c и ϵ_{s1} намаляват. Напрежението в армировката не се променя, но σ_c намалява. Това движение на диаграмата на деформациите се нарича „завъртане с приплъзване надолу тип 2“. Равновесието се постига при условието $\epsilon_c < \epsilon_{c3}$ и $\epsilon_{yd} < \epsilon_{s1} < \epsilon_{ud}$, а решението се получава от **задача 2**. Това завъртане продължава до $\epsilon_{s1} = \epsilon_{yd}$. След това $\epsilon_c < \epsilon_{c3}$ и $\epsilon_{s1} < \epsilon_{yd}$ и решението се получава от **задача 1**. При **задача 1** диаграмата на деформациите се завъртва до момента, в който деформациите в бетона и армировката станат 0. Това движение на диаграмата се нарича „завъртане тип 1“. Стойността на момента при границата между „завъртане с приплъзване надолу тип 2“ (задача 2) и „завъртане тип 1“ (задача 1) е равен на:

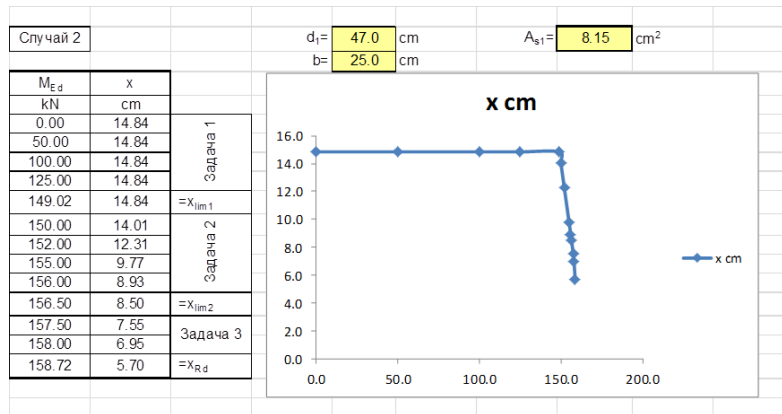
$$M_{lim1} = A_{s1} f_{yd} \left(d_1 - \frac{1}{3} x_{lim1} \right). \quad (34)$$

➤ *Случай 2: $x_2 < x_{Rd} \leq x_{23}$, $\epsilon_{c3} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu3}$ и $\epsilon_{s1} = \epsilon_{ud}$*

Максималната стойност за момента е M_{Rd} и се получава при $x = x_{Rd}$ и $\sigma_{s1} = f_{yd}$ и $\sigma_c = f_{cd}$. Диаграмата на напреженията в бетона е трапецовидна. Намалявайки външния момент, намаляват стойностите на ϵ_c и ϵ_{s1} . Височината на натисковата зона расте. Това движение на диаграмата на деформациите се нарича „завъртане с приплъзване надолу тип 3“. Решението се получава от **задача 3**. Граничната стойност е при $\epsilon_c = \epsilon_{c3}$. От тук нататък следва „завъртане с приплъзване надолу тип 2“ и решение от **задача 2** и „завъртане тип 1“ и решение от **задача 1**. Граничните стойности на височината на натисковата зона и момента между „завъртане с приплъзване надолу тип 3“ (задача 3) и „завъртане с приплъзване надолу тип 2“ (задача 2) са:

$$x_{lim2} = \frac{2A_{s1} f_{yd}}{f_{cd} b}, \quad (35)$$

$$M_{lim2} = A_{s1} f_{yd} \left(d_1 - \frac{1}{3} x_{lim2} \right). \quad (36)$$



Фиг. 6. Графика на функцията $x(M_{Ed})$ при случай 2

➤ Случай 3: $x_{23} < x_{Rd} \leq x_{34}$, $\epsilon_c = \epsilon_{cu3}$ и $\epsilon_{yd} < \epsilon_{s1} \leq \epsilon_{ud}$. Случай 3 се разделя на два подслучая:

Случай 3.1. Външният момент започва да намалява от M_{Rd} и линията на деформациите се завърта. Първо в бетона се достигат деформации $\epsilon_c = \epsilon_{c3}$, а в армировката са все още $\epsilon_{yd} < \epsilon_{s1} \leq \epsilon_{ud}$. Този подслучай се решава като случай 2.

Случай 3.2. При него като намалява външния момент и линията на деформациите се завърта, първо в армировката се достигат деформации $\epsilon_{s1} = \epsilon_{yd}$, докато деформациите в бетона са все още $\epsilon_{c3} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu3}$.

С помощта на правата задача се намират $x = x_{Rd}$ и M_{Rd} – горна граница на интервала. Следва завъртане на диаграмата – „завъртане с приплъзване надолу тип 3“ и решение от задача 3. Височината на натисковата зона расте. В края на интервала деформациите са $\epsilon_{s1} = \epsilon_{yd}$ и $\epsilon_{c3} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu3}$. При следващото завъртане на диаграмата напреженията в армировката и бетона намаляват, намалява и x . Това движение се нарича „завъртане с приплъзване нагоре тип 4“. При него $\epsilon_{s1} \leq \epsilon_{yd}$ и $\epsilon_{c3} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu3}$, решение се получава от задача 4. Границата на този случай е при $\epsilon_c = \epsilon_{c3}$. След това следва „завъртане тип 1“ и решение от задача 1. При границата между „завъртане с приплъзване надолу тип 3“ (задача 3) и „завъртане с приплъзване нагоре тип 4“ (задача 4) за височината на натисковата зона x_{lim3} и момента M_{lim3} се получава:

$$x_{lim3} = \frac{2A_{s1} f_{yd} \epsilon_{yd} + d_1 \epsilon_{c3} f_{cd} b}{f_{cd} b (2\epsilon_{yd} + \epsilon_{c3})}, \quad (37)$$

$$\alpha_{lim3} = 1 - \frac{(d_1 - x_{lim3}) \epsilon_{yd}}{x_{lim3} \epsilon_{c3}}, \quad (38)$$

$$M_{lim3} = A_{s1} f_{yd} (d_1 - \gamma_{lim3} x_{lim3}). \quad (39)$$

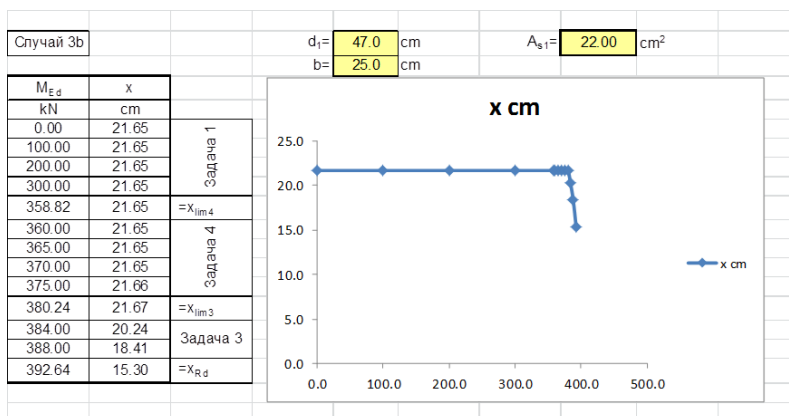
При границата между „завъртане с приплъзване надолу тип 4“ (задача 4) и „завъртане тип 1“ (задача 1) височината на натисковата зона е $x_{lim4} = x_{lim1}$ а граничният момент M_{lim4} се получава:

$$M_{lim4} = 0,5x_{lim4}bf_{cd} \left(d_1 - \frac{1}{3}x_{lim4} \right). \quad (40)$$

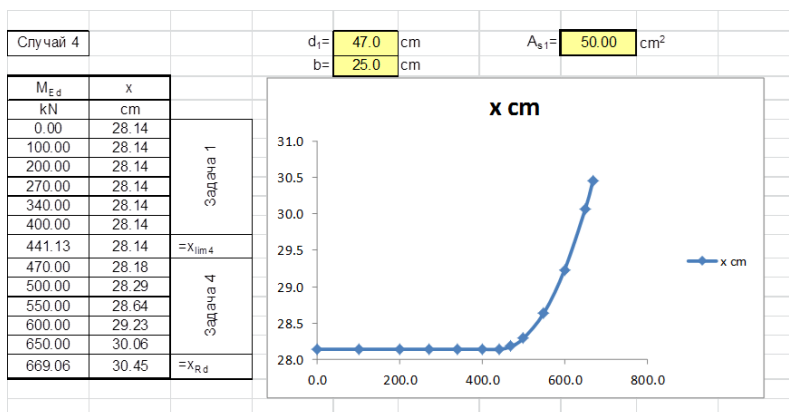
Границата между случай 3.1 и 3.2 се получава при:

$$x_m = \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_{c3} + \varepsilon_{yd}} d_1, \quad (41)$$

$$A_{s1,lim} = \frac{f_{cd}}{2f_{yd}} x_m b. \quad (42)$$



Фиг. 7. Графика на функцията $x(M_{Ed})$ при случай 3.2



Фиг. 8. Графика на функцията $x(M_{Ed})$ при случай 4

➤ Случай 4: $x_{34} < x_{Rd}$, $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu3}$ и $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd}$

В началото височината на натисквата зона и моментът са x_{Rd} и M_{Rd} . Следва движение на линията на деформациите „завъртане с приплъзване на горе тип 4“ до достигане на $\varepsilon_c = \varepsilon_{c3}$ и решението на задача 4. Следва „завъртане тип 1“ и решение от задача 1. Височината на натисквата зона намалява в интервала $[x_{lim4}; x_{Rd}]$. В сила е формула (40) за границата между задача 4 и задача 1.

За да се реши задачата трябва да се използва следния алгоритъм:

1. Решава се задачата за носимоспособност. Прави се проверката дали $M_{Ed} \leq M_{Rd}$.
2. Решава се задача 1. Намира се x_{lim1} .
3. Намира се стойностите за $A_{s1,lim}$, M_{lim1} , M_{lim2} , M_{lim3} и M_{lim4} .
4. Ако $A_{s1} \leq A_{s1,lim}$ и $M_{Ed} \leq M_{lim1}$ то решението е от задача 1.
5. Ако $A_{s1} \leq A_{s1,lim}$ и $M_{lim1} < M_{Ed} \leq \min(M_{lim2}; M_{Rd})$ то решението е от задача 2.
6. Ако $A_{s1} \leq A_{s1,lim}$ и $M_{lim2} < M_{Ed} \leq M_{Rd}$ то решението е от задача 3.
7. Ако $A_{s1} > A_{s1,lim}$ и $M_{Ed} \leq M_{lim4}$ то решението е от задача 1.
8. Ако $A_{s1} > A_{s1,lim}$ и $M_{lim4} < M_{Ed} \leq \min(M_{lim3}; M_{Rd})$ то решението е от задача 4.
9. Ако $A_{s1} > A_{s1,lim}$ и $M_{lim3} < M_{Ed} \leq M_{Rd}$ то решението е от задача 3.

3. Решение на EXCEL

Намиране на деформациите и напрежнията в правоъгълно сечение с единична армировка					
f_{ck}	50.00	Mpa	f_{yk}	500	Mpa
a_{ec}	1.000		γ_s	1.150	
γ_c	1.500		E_s	200000	Mpa
f_{cd}	33.33	Mpa	f_{yd}	434.78	Mpa
f_{ctm}	4.072	MPa	ϵ_{yd}	0.00217	
ϵ_{c3}	0.00175		ϵ_{ud}	0.02500	
ϵ_{cu3}	0.00350				
ρ	0.60%		$A_{s,min}$	2.49	cm ²
			$A_{s,max}$	47.00	cm ²
As,min < As < As,max					
x_2	3.07	cm	x_{23}	5.77	cm
$A_{s1,12}$	2.95	cm ²	$A_{s1,23}$	8.30	cm ²
$A_{s1,lim}$	20.09	cm ²	$A_{s1,34}$	41.68	cm ²
Случай 2					
α	0.427		γ	0.376	
ϵ_c	0.00306		σ_c	33.33	Mpa
ϵ_{s1}	0.02500		σ_{s1}	434.78	Mpa
M_{Rd}	137.19	kNm	$M_{Rd,max}$	843.72	kNm
MEd < MRd					
x_{lim1}	13.94	cm	M_{lim1}	128.90	kNm
x_{lim2}	7.30	cm	M_{lim2}	135.63	kNm
x_{lim3}	16.09	cm	M_{lim3}	115.99	kNm
x_{lim4}	13.94	cm	M_{lim4}	246.03	kNm
			α_{lim3}	-0.546	
x	13.94	cm	Задача	1	
α	0.000		γ	0.333	
ϵ_c	0.00078		σ_c	14.90	Mpa
ϵ_{s1}	0.00186		σ_{s1}	371.03	Mpa

4. Заключение

Описаната процедура дава възможност за намиране на деформираното и напрегнатото състояние на правоъгълно стоманобетонно сечение с единична армировка, натоварено на чисто огъване по едната си ос. Задачата е решена емпирически и полученото

решение подлежи лесно на алгоритмизиране и програмиране. Задачата може да служи като част от процедура за оразмеряване на усилен стоманобетонни сечения с отчитане на предварителните деформации в тях, вследствие на експлоатацията на сечението преди усиляването.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русев, К. Сторманобетон – НПСБК-ЕС2, АВС Техника, 2008.
2. БДС EN 1992-1-1 Еврокод 2 Проектиране на бетонни и сторманобетонни конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради.
3. Чардакова, Т., Възгечев, К., Трайкова, М. Усилване на конструктивни елементи от монолитни сторманобетонни скелетно-гредови конструкции. Нова Кампания, 2015, София.

COMPUTING PROCEDURES FOR ANALYSIS OF RECTANGULAR RC CROSS SECTIONS WITH SINGLE REINFORCEMENT, SUBJECTED TO BENDING – PROBLEM OF THE EQUILIBRIUM

V. Mihov¹, M. Traykova²

Keywords: reinforced concrete, bending, computing procedures

Research area: reinforced concrete and reinforced concrete structures

ABSTRACT

The paper is focused on the most important steps in the process of creating of computing procedures for analysis of rectangular reinforced concrete sections, subjected to bending with single reinforcement. Based on the problem for the definition of the bearing capacity of the cross section and the problem for the design of the reinforcement in the cross section, the definition of the actual stresses and strains in the cross section in the case of different loads is presented (problem of the equilibrium). The main cases are considered and a detailed analysis of the analytical solutions is done. Finally, schemes of the computing procedures and numerical examples, using EXCEL, are developed.

¹ Velislav Mihov, Assist. Eng., Dept. “Computer-Aided Engineering”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: vmixovz@mail.bg

² Marina Traykova, Prof. Dr. Eng., Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: marina5261@abv.bg

