

УДК 624.012.35:620.173/174

Розрахунок міцності нормальних і похилих перерізів залізобетонних згинальних елементів у контексті з теорією класичного опору матеріалів

Кочкаръов Д.В., к.т.н., Бабич В.І., к.т.н.

Національний університет водного господарства та природокористування,
Україна

Анотація. Запропоновано практичну методику розрахунку нормальних і похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів, яка базується на використанні розрахункових опорів залізобетону. Наведено порядок визначення міцності перерізів залізобетонних елементів та визначення необхідної площі перерізу арматури. Розглянуті переваги представленої методики.

Аннотация. Предложена практическая методика расчета нормальных и наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов с использованием расчетных сопротивлений железобетона. Приведен порядок определения прочности сечений железобетонных элементов и определения необходимой площади сечения арматуры. Рассмотрены преимущества предложенной методики.

Abstract. Practical calculation method is proposed for normal and oblique sections of bending concrete elements based on use of calculated resistance of reinforced concrete. The order for determining the strength of sections of concrete elements and determining necessary cross-sectional area of reinforcement is presented. Advantages of presented techniques are considered.

Ключові слова: залізобетон, згин, балка, опір.

Струнка, логічна та проста теорія опору матеріалів придатна для розрахунку однорідних матеріалів, які на розрахунковій стадії працюють пружно. У будівельній практиці, у переважній більшості, використовують такі матеріали, в яких на цій стадії проявляються пластичні властивості. Застосовувати для розрахунку елементів за граничними станами прості формули опору матеріалів можна лише, вводячи до них поправочні коефіцієнти, які враховують зміну деформативних властивостей матеріалів за відповідного стану. Таким чином діють у розрахунках елементів із металу, дерева та частково будівельного каменю. А от розрахунок залізобетонних елементів і конструкцій виконують за розрахунковими методиками, в яких формули опору матеріалів використовують епізодично.

Спроби системного застосування формул опору матеріалів були на початку творення теорії розрахунку залізобетону, але безрезультатні через особливості роботи матеріалу: він не є однорідним, а комплексним матеріалом; у бетоні навіть за незначних напружень проявляються

пластичні деформації; залізобетон може працювати з тріщинами, що не є допустимим в однорідних матеріалах. Накопичені на даний час багаторічні знання щодо роботи та розрахунку залізобетону, введення нормативних документів з розрахунку за деформаційною моделлю дозволяють виконувати розрахунок залізобетонних елементів і конструкцій у тісному взаємозв'язку з теорією опору матеріалів. Для подальшого формування такої методики розрахунку залізобетону: 1) приймемо залізобетон як єдиний матеріал зі своїми характеристиками; 2) введемо такі поняття як "розрахунковий опір залізобетону за різних силових впливів f_{zi} "; "напруження у залізобетоні за відповідних рівнів навантаження та впливів σ_{zi} "; "сумарні відносні деформації залізобетону $\Sigma\varepsilon$ ", які являють суму деформацій стиснутої грані перерізу та розтягнутої арматури.

Залізобетонні елементи та конструкції розраховують за першою та другою групами граничних станів на основі рівнянь рівноваги зовнішніх та внутрішніх зусиль у перерізах, умов деформування перерізів і елементів, діаграм стану бетону та арматури. Розрахунок деформаційним методом з однієї сторони значно ускладнив розрахункові процеси, з іншої сторони – надав науковцям і проектувальникам більшої свободи у формуванні розрахункового апарату. Так, єдиний запис рівнянь рівноваги внутрішніх і зовнішніх зусиль можна використати для всіх розрахунків від утворення тріщин до обчислення несучої здатності при зміні параметрів напружено-деформованого стану перерізів за відповідної стадії та критеріїв досягнення необхідного стану.

Найбільш поширені у будівництві згинальні та позацентрово стиснуті залізобетонні елементи. Саме їх розрахунок становить найбільшу складність. В одній статті неможливо охопити все, що стосується розрахунків, тому зупинимось на формуванні розрахункового апарату згинальних залізобетонних елементів прямокутного профілю, узагальнюючи підходи для отримання параметрів напружено-деформованого стану перерізів.

Від початку завантаження до руйнування постійно змінюється напружено-деформований стан перерізів: згинальний елемент працює без тріщин, в окремих перерізах виникають тріщини, частина перерізів працює без тріщин до самого руйнування, розкриваються тріщини, змінюється кривина елемента, наступає руйнування найбільш напруженого перерізу. Кожна стадія роботи характеризується своїми рівняннями рівноваги внутрішніх і зовнішніх зусиль у перерізі.

До того ж елемент може буди з одиничним і подвійним армуванням. Запишемо для експлуатаційної стадії (рис. 1) рівняння рівноваги зусиль у перерізі без тріщин після деяких перетворень у такому вигляді:

$$\frac{E_s(k-1) \int_0^{\frac{\sigma_{s,m}}{E_s(k-1)}} \sigma_c d\varepsilon}{\sigma_{s,m}} - \frac{(k-1+kn) \int_0^{\varepsilon_{ctu}} \sigma_{ct} d\varepsilon}{\varepsilon_{ctu}} - \sigma_{s,m} k \rho_f + \frac{k(1-kn)}{k-1} \rho_{fc} \sigma_{s,m} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{E_s^2(k-1)^2 \int_0^{\frac{\sigma_{s,m}}{E_s(k-1)}} \sigma_c \varepsilon d\varepsilon}{k^2 \sigma_{s,m}^2} + \frac{(k-1+kn)^2 \int_0^{\varepsilon_{ctu}} \sigma_{ct} \varepsilon d\varepsilon}{k^2 \varepsilon_{ctu}^2} + \frac{k-1}{k} \sigma_{s,m} \rho_f + \frac{(1-kn)^2}{k(k-1)} \rho_{fc} \sigma_{s,m} = \frac{M}{bd^2}, \quad (2)$$

де σ_c , σ_t – функції напружень у бетоні стиснутої та розтягнутої зон;
 σ_{si} – напруження в арматурі розтягнутої зони у різних стадіях роботи;

$$k = \frac{d}{x}; \quad n = \frac{a_{sc}}{d}; \quad \rho_{fc} = \frac{A_{sc}}{bd}; \quad \rho_f = \frac{A_s}{bd}. \quad (3)$$

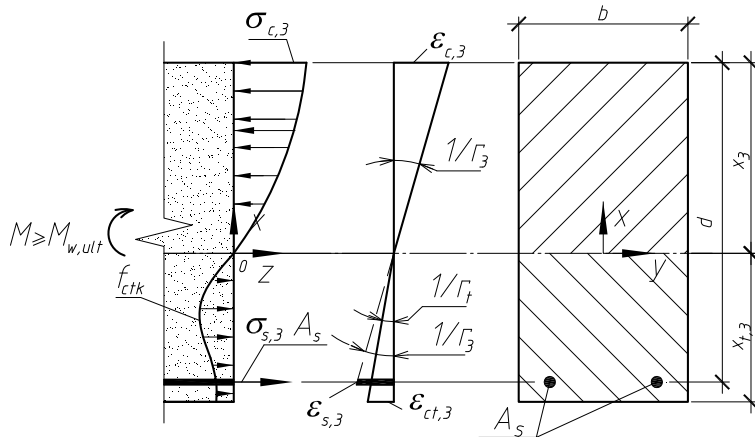


Рис. 1. Стадія напружено-деформованого стану в перерізі без тріщин, при $M \geq M_{w,ult}$

Сума моментів зусиль прийнята відносно нейтральної лінії. Розв'язуючи спільно рівняння (1) і (2), отримаємо значення k . Ліва частина виразу (2) не включає розмірів перерізу елемента, арматура представлена процентом армування і тільки характеристики бетону та арматури виражені

абсолютними значеннями. Результат обчислення за формулою (2) не зміниться, якщо ліву та праву частини її помножити на довільне число (крім нуля). Помножимо їх на 6. Тоді праву частину, спираючись на опір матеріалів, запишемо так:

$$\frac{6M}{bd^2} = \frac{M}{W_c} = \sigma_{zM}, \quad (4)$$

де M – момент, який діє у перерізі на розглядуваній стадії роботи елемента; W_c – пружний момент опору робочого перерізу бетону; σ_{zM} – напруження у залізобетоні перерізу на розглядуваній стадії роботи елемента.

Враховуючи викладене, рівняння (2) запишемо так:

$$\frac{E_s^2 (k-1)^2 \int_0^{\frac{\sigma_{s,m}}{E_s(k-1)}} \sigma_c \varepsilon d\varepsilon}{k^2 \sigma_{s,m}^2} + \frac{(k-1+kn)^2 \int_0^{\varepsilon_{ct}} \sigma_{ct} \varepsilon_{ct} d\varepsilon}{k^2 \varepsilon_{ct}^2} +$$

$$+ \frac{k-1}{k} \sigma_{s,m} \rho_f + \frac{(1-kn)^2}{k(k-1)} \rho_{fc} \sigma_{s,m} = \sigma_{zM}. \quad (5)$$

Розглядаючи конкретну стадію роботи елемента – до утворення первинних тріщин, переріз з тріщиною, переріз без тріщини між двома тріщинами, елемент з одиничним або подвійним армуванням, короткочасна чи тривала дія навантажень – та використовуючи додаткову систему умов, отримують параметри напружено-деформованого стану (НДС) перерізу на цій стадії. На кожній з них склад системи додаткових умов свій, а взагалі вони включають: функції напружень у бетоні та арматурі; гіпотезу плоских перерізів для бетону та арматури; умову мінімуму потенціальної енергії; критерій настання розглядуваної стадії; зміну деформацій в арматурі та бетоні на ділянці між тріщинами.

Для розрахунку згинальних елементів у стадії експлуатації потрібні такі параметри НДС: напруження у залізобетоні σ_{zM} , напруження в арматурі у перерізі з тріщиною та без тріщини σ_s або усереднені напруження σ_{zm} , сумарні деформації стиснутої грані перерізу та розтягнутої арматури $\Sigma\varepsilon$, розрахунковий опір залізобетону на утворення тріщин f_{zW} . Всі названі параметри розраховані залежно від класів бетону, арматури та процентів армування перерізу і зведені у таблиці, які наведені в [1, 2, 3].

Перераховані параметри НДС мають функціональний зв'язок між собою і знаходяться у певній математичній залежності. Найбільш проста і чітка залежність прослідковується між напруженнями у залізобетоні σ_{zM} і напруженнями в арматурі σ_s . Розрахувавши параметри для різних рівнів навантаження та процентів армування, одержали пряму лінійну залежність:

$$\sigma_{zM} = \alpha \sigma_s \quad (6)$$

з коефіцієнтами кореляції у межах 0,97–0,985. Значення коефіцієнта пропорційності α , зокрема, при розрахункових величинах характеристик міцності бетону та арматури наведені [4].

У розрахунках за несучою здатністю приймають такі критерії руйнування перерізу:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dM}{d\varepsilon} = 0 \text{ або } \frac{dM}{d1/r} = 0 \text{ при } \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}; \\ \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}; \quad \varepsilon_{sc} \leq \varepsilon_{su}. \end{array} \right. \quad (7)$$

При цьому досягнення несучої здатності може наступати при різних комбінаціях напружень у розтягнутій та стиснутій арматурі:

$$\begin{array}{l} 1) \sigma_{sc} = f_{yc}; \sigma_s < f_{yd}; \quad 2) \sigma_{sc} = f_{yc}; \sigma_s = f_{yd}; \\ 3) \sigma_{sc} < f_{yc}; \sigma_s < f_{yd}; \quad 4) \sigma_{sc} < f_{yc}; \sigma_s = f_{yd}. \end{array} \quad (8)$$

У граничному стані за міцністю напруження у залізобетоні дорівнюють розрахунковому опору залізобетону на згин f_{zM} , тобто аналогічно до формули (4) запишемо

$$f_{zM} = \frac{M_{Ed}}{W_c}. \quad (9)$$

Враховуючи критерії (7), умови роботи арматури (8), формула (5) у розрахунках несучої здатності для кожної з умов (8) набуде вигляду:

$$f_{zM,1} = 6 \frac{\int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c \varepsilon_c d\varepsilon + \rho_{fc} f_{yc} (k - nk^2) + \varepsilon_c (k-1)^2 k \rho_f E_s}{\varepsilon_c^2 k^2}; \quad (10)$$

$$f_{zM,2} = 6 \frac{\int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c \varepsilon_c d\varepsilon + \rho_{fc} f_{yc} (k - nk^2) + \rho_f f_{yd} (k^2 - k)}{\varepsilon_c^2 k^2}; \quad (11)$$

$$f_{zM,3} = 6\varepsilon_c \frac{\int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c \varepsilon_c d\varepsilon + E_s \rho_{fc} (1 - nk)^2 k + E_s \rho_f (k - 1)^2 k}{\varepsilon_c^3 k^2}; \quad (12)$$

$$f_{zM,4} = 6\varepsilon_c \frac{\int_0^{\varepsilon_c} \sigma_c \varepsilon_c d\varepsilon + E_s \rho_f (1 - nk)^2 k + \frac{f_{yd}}{\varepsilon_c} \rho_f (k - 1) k}{\varepsilon_c^3 k^2}. \quad (13)$$

Значення k для наведених формул отримують із рівняння суми проєкцій внутрішніх зусиль на поздовжню вісь елемента за відповідних напружень в арматурі при руйнуванні елемента.

Обчисливши значення розрахункового опору залізобетону f_{zM} за формулами (10)–(13), приймаємо найменше з них як розрахунковий опір залізобетону для конкретних класів арматури та бетону і проценту армування. За одиничного армування у формулах (10)–(13) арматуру стиснутої зони приймають такою, що дорівнює нулю. Для зменшення об'єму розрахункових обчислень при проектуванні залізобетонних елементів на основі чисельних розрахунків складені таблиці розрахункового опору залізобетону для елементів з одиничним армуванням $f_{zM,1}$ та з подвійним армуванням $f_{zM,2}$.

Маючи таблиці параметрів НДС перерізів і розрахункових опорів залізобетону, розрахунки залізобетонних згинальних елементів з урахуванням нелінійного деформування матеріалів зводиться до нескладних обчислень. Розглянемо їх.

Розрахунок міцності нормальних перерізів. При проектуванні частіше розглядають дві задачі.

1. Необхідно визначити площу перерізу робочої арматури A_s , потрібної для сприйняття згинального моменту M_{Ed} балкою з робочим перерізом $b \times d$ за відомих класів бетону та арматури.

За формулою (9) визначають той розрахунковий опір залізобетону, за якого балка сприйме згинальний момент. По таблиці розрахункових опорів знаходять процент армування ρ_f , що забезпечить визначений розрахунковий опір залізобетону. Обчислюють площу перерізу арматури $A_s = (\rho_f \times b \times d) / 100$.

2. Залізобетонна балка з робочим перерізом $b \times d$ армувана сталлю з площею поперечного перерізу A_s . Класи арматури та бетону задані. Розрахувати значення згинального моменту, який може сприйняти балка.

Обчислюють відсоток армування перерізу $\rho_f = A_s / (b \times d) \times 100$. За таблицею розрахункових опорів залізобетону по заданих класах бетону та арматури знаходять значення f_{zM} , яке відповідає обчисленому відсотку арматури, а по ньому з формули (9) визначають допустимий на балку момент $M_{Ed} = f_{zM} W_c$.

Крім зазначених можна вирішувати інші задачі, зокрема: за відомого моменту, відсотку армування та класів матеріалів розрахувати розміри перерізу; за вказаних розмірів перерізу та значення згинального моменту визначити класи бетону та арматури і відсоток армування, за яких несуча здатність балки буде забезпечена.

Розрахунок елементів таврового та двотаврового профілів можна виконувати за цією методикою [5], приймаючи момент опору робочого перерізу бетону при положенні нейтральної лінії у стиснутій полиці:

$$W_c = \frac{b_f d^2}{6}, \quad (14)$$

а при знаходженні у ребрі

$$W_c = \frac{b_f d^2}{6} - \frac{(b_f - b)(d - h_f)^2}{6}, \quad (15)$$

де b_f і h_f – розміри стиснутої полицки.

Якщо положення нейтральної лінії невідоме, виконують два розрахунки. При обчисленні несучої здатності приймають менше з двох значень, а знаючи площу перерізу робочої арматури, – більше.

Спрощення розрахунків несучої здатності у деформаційній моделі можливе завдяки використанню наперед складених таблиць, які використовують зарубіжні вчені, зокрема [6, 7]. У роботі [6] введено поняття "механічний процент армування":

$$\varpi = \frac{A_s f_{yd}}{b d f_{cd}}. \quad (16)$$

Якщо його використати, то значення розрахункового опору залізобетону для елементів з одиничним армуванням можна обчислювати за формулою:

$$f_{zM} = 3\varpi f_{cd} (2 - \varpi), \quad (17)$$

а розрахунок міцності виконувати без таблиць.

1. Відомі M_{Ed} , b , d , f_{yd} , f_{cd} . Визначити A_s .

За формулою (9) обчислюють f_{zM} , а потім знаходять $\varpi = 1 - \sqrt{1 - f_{zM} / (3f_{cd})}$, а з формули (16) – потрібну арматуру.

2. Відомі A_s , b , d , f_{yd} , f_{cd} . Визначити M_{Ed} .

За формулою (17) розраховують значення f_{zM} , а із формули (9) обчислюють M_{Ed} .

Розрахунок міцності похилих перерізів на спільну дію згинального моменту M_{Ed} і поперечної сили V_{Ed} пропонуємо виконувати способом, основаним на гіпотезі максимальних дотичних напружень, при досягненні яких у крихких матеріалах відбувається руйнування у вигляді відриву, а у пластичних настає границя текучості. Значення максимальних дотичних напружень досягається, коли вони стають такими, що дорівнюють половині різниці найбільших і найменших головних напружень [8]:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad (18)$$

де σ_1 і σ_3 – головні стискальні та розтягувальні напруження плоского напруженого стану;

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau^2}; \quad \sigma_3 = \frac{\sigma_x}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau^2}, \quad (19)$$

де σ_x – нормальні напруження від дії M_{ed} , τ – дотичні напруження від дії V_{ed} .

Напружено-деформований стан елементарного об'єму, в якому виникають напруження σ_1 і σ_3 , замінимо рівно небезпечним, в якому діє тільки одне еквівалентне напруження, за якого у матеріалі виникають максимальні дотичні напруження:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{ek}. \quad (20)$$

Враховуючи формули (19), вираз (20) подамо у такому вигляді:

$$\frac{\sigma_x^2}{\sigma_{ек}^2} + \frac{4\tau^2}{\sigma_{ек}^2} = 1. \quad (21)$$

По довжині залізобетонної балки змінюється значення зусиль. У перерізі, де діє згинальний момент і відсутня поперечна сила, значення еквівалентного напруження дорівнює максимальним напруженням у матеріалі $\sigma_{ек} = \sigma_{сmax}$. У перерізі, де наявна тільки поперечна сила, виникають максимальні дотичні напруження, що дорівнюють половині еквівалентних напружень $\tau_{max} = 0,5\sigma_{ек}$. При розрахунку залізобетонних балок на спільну дію момента та поперечної сили мова йде про можливість прийняття бетоном діючих зусиль. І тільки у разі неспроможності бетону враховують поперечну арматуру. Отже, в умові (21) фігурують тільки параметри бетону. До того ж, міцність похилого перерізу буде забезпечена тоді, коли числівники доданків будуть не більшими від їхніх знаменників. У такому разі умова міцності перерізів на спільну дію згинального момента та поперечної сили (21) прийме такий вигляд:

$$\frac{\sigma_c^2}{\sigma_{сmax}^2} + \frac{\tau_c^2}{\tau_{сmax}^2} \leq 1. \quad (22)$$

Для визначення параметрів умови міцності через зусилля у згинальному елементі розглянемо схему зусиль у нормальному перерізі поблизу головної похилої тріщини у дещо спрощеному вигляді (рис. 2).

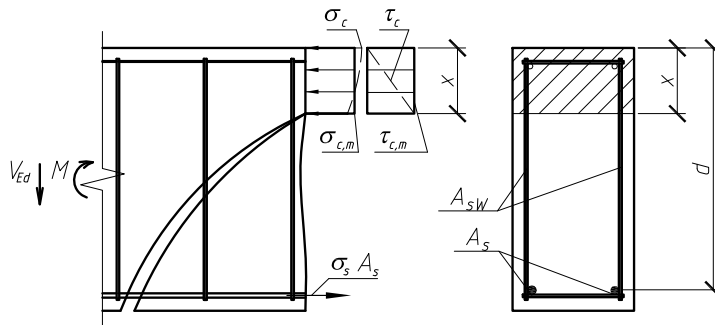


Рис. 2. Спрощена схема зусиль у нормальному перерізі поблизу головної похилої тріщини

Запишемо рівняння рівноваги зусиль у силевій моделі, розв'язок яких простіший та наглядний і дає такий самий результат за міцністю, як і за деформаційною моделлю. Суму моментів братимемо відносно стиснутої грані перерізу. Із рівнянь рівноваги, враховуючи формули (4) і (6), напруження у бетоні стиснутої зони визначаються умовою:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{zM} \rho_f}{2\alpha(1 - \alpha / (6\rho_f))}, \quad (23)$$

а максимальні напруження у бетоні виразимо через розрахунковий опір залізобетону у розрахунковому перерізі, прийнятий по наявній площі перерізу робочої арматури:

$$\sigma_{c\max} = \frac{f_{zM} \rho_f}{2\alpha(1 - \alpha / (6\rho_f))}. \quad (24)$$

Висота стиснутої зони, визначена з рівнянь рівноваги зусиль з урахуванням формули (6), дорівнюватиме

$$x = 2d(1 - \alpha / (6\rho_f)). \quad (25)$$

У місці максимальної поперечної сили за відсутності згинального моменту бетон перерізу зазнає чистого зсуву. Експериментально підтверджено, що максимальні дотичні напруження у 2–2,5 рази перевищують розрахунковий опір бетону на розтяг, тобто:

$$\tau_{\max} = V_{Ed} / (bd) = 2f_{ctd}. \quad (26)$$

За наявності тріщини дотичні напруження зсуву зростають і по висоті стиснутої зони розподіляються по трикутнику. Усереднене значення їх визначимо за формулою:

$$\tau_{\max} = \frac{f_{ctd}}{2(1 - \alpha / (6\rho_f))}. \quad (27)$$

У розрахунковому перерізі з розрахунковою поперечною силою V_{Ed} і згинальним моментом M виникають зсувні напруження, парні дотичним. Ці напруження сприймаються бетоном і арматурою:

$$V_{Ed} / (bx) = \tau_c + \tau_s. \quad (28)$$

Зсувні напруження, які виникають у бетоні, обчислимо за формулою:

$$\tau_c = \frac{V_{Ed}}{bx} - \tau_s = \frac{V_{Ed}}{2bd(1 - \alpha / (6\rho_f))} - \tau_s. \quad (29)$$

Зсувні напруження, які може сприйняти поперечна арматура, визначаються її параметрами:

$$\tau_s = \frac{A_{sw} f_{ywd}}{bs}, \quad (30)$$

де s – крок поперечних стрижнів.

Враховуючи формули (23), (24), (27) і (29), умову міцності похилих перерізів на спільну дію згинального моменту і поперечної сили подамо так:

$$\left(\frac{\sigma_{zM}}{f_{zM}} \right)^2 + \left(\frac{V_{Ed}}{bdf_{ctd}} - \frac{\tau_s}{\tau_{max}} \right)^2 \leq 1. \quad (31)$$

Коли міцність похилого перерізу на дію M і V_{Ed} забезпечується поздовжньою робочою арматурою та бетоном над головною похилою тріщиною, тобто при $\tau_s=0$, поперечна арматура або не ставиться, або розміщується за технологічними чи конструктивними вимогами. Якщо ж для забезпечення несучої здатності потрібна ще й поперечна арматура, з нерівності (31) визначають зсувні напруження у ній:

$$\tau_s \geq \left(\frac{V_{Ed}}{bdf_{ctd}} - \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{zM}}{f_{zM}} \right)^2} \right) \tau_{max}, \quad (32)$$

за якими, користуючись формулою (30), розраховують діаметр або крок поперечних стрижнів, ув'язуючи це з правилами конструювання.

Приймаючи у формулі (31) $\tau_s=0$, отримуємо значення поперечної сили, при якій міцність похилого перерізу забезпечується поздовжньою арматурою та бетоном:

$$V \leq bdf_{ctd} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{zM}}{f_{zM}} \right)^2}. \quad (33)$$

Максимальний крок між вертикальною поперечною арматурою визначають із умови, що похила тріщина перетне її хоча б один раз. Враховуючи, що перша похила тріщина утворюється у місці найбільших дотичних напружень, тобто біля нейтральної лінії, та направлена під кутом 45° , максимальний крок не може бути більшим відстані від нейтральної лінії до поздовжньої арматури.

$$s_{max} = d - x = d \left(\alpha / (3\rho_f) - 1 \right). \quad (34)$$

Виконання умови (31) забезпечує не тільки несучу здатність похилих перерізів на дію поперечної сили та згинального моменту, а й міцність стиснутої полоси між похилими тріщинами. До того ж, наявність у

розрахункових формулах процента армування поздовжньої робочої арматури опосередковано враховує вплив нагельного ефекту та зчеплення (тертя) бетону по берегах похилої тріщини на міцність похилого перерізу.

Висновки

1. Викладена методика розрахунку залізобетонних елементів базується на прийнятті залізобетону як матеріалу зі своїми характеристиками, а саме: розрахунковий опір залізобетону f_{zi} , напруження у залізобетоні σ_{zi} , сумарні відносні деформації перерізу $\Sigma\varepsilon$, які дорівнюють деформаціям стиснутої грані та розтягнутої арматури.
2. Весь розрахунковий апарат методу отриманий із рівнянь рівноваги внутрішніх і зовнішніх зусиль за нелінійного деформування матеріалів з використанням обґрунтованих передумов, гіпотез і додаткових умов без будь-яких емпіричних включень.
3. На основі великого обсягу обчислень за одержаними залежностями у безрозмірному вигляді стосовно геометричних параметрів складені таблиці розрахункових опорів залізобетону, параметрів напружено-деформованого стану перерізів, залежності параметрів кривини. Використання їх дозволяє звести складні розрахунки елементів і перерізів до виконання простих операцій.
4. Розрахунок залізобетонних елементів за граничними станами першої та другої груп виконується за формулами опору матеріалів або близькими до них. Це гармонізує розрахунки будівельних конструкцій незалежно від виду матеріалів: металевих, дерев'яних, залізобетонних, кам'яних.
5. Точність розрахунків за запропонованим методом відповідає точності методики, закладеної у чинних нормах і стандартах з проектування залізобетонних елементів, бо є їхнім безпосереднім продовженням.
6. У разі прийняття розрахунку залізобетонних елементів за запропонованою методикою при отриманні нових наукових, виробничих і технологічних знань про властивості та роботу матеріалів не потрібно буде міняти розрахунковий апарат, як це не раз робилось. Достатньо лише внести зміни у значення розрахункових опорів залізобетону та параметрів НДС перерізів.
7. Технологія розрахунку залізобетонних елементів на дію тривалих, повторних і малоциклових навантажень, а також температурних і вологісних впливів аналогічна описаній з використанням розрахункових опорів і параметрів НДС для відповідних навантажень і впливів.

Література

- [1] Кочкаръов Д. В. Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам: монографія / Д. В. Кочкаръов. – Рівне: О. Зень, 2015. – 384 с. : Іл. : 139; табл. 48; бібліогр: 326.
- [2] Кочкаръов Д. В. Передумови розрахунку та розрахунок прогинів залізобетонних елементів, що зазнають згину, з урахуванням нелінійного деформування матеріалів / Д. В. Кочкаръов, В. І. Бабич // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – К. : ДП НДІБК, 2011. – Вип. 74. – Книга 1. – С. 406–413.
- [3] Кочкаръов Д. В. Практичний розрахунок залізобетонних елементів на міцність за дії згинального моменту на базі ДБН В.2.6-98:2009 / Д. В. Кочкаръов, В. І. Бабич // Комунальне господарство міст. – Харків : ХНАМГ, 2012. – Вип. 103. – С. 46–57.
- [4] Кочкаръов Д. В. Розрахунок похилих перерізів методом розрахункових опорів залізобетону / Д. В. Кочкаръов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. – Рівне, 2014. – Вип. 29. – С. 200–207.
- [5] Кочкарёв Д. В. Расчет прочности нормальных сечений элементов таврового профиля на изгиб с учетом нелинейного деформирования материалов / Д. В. Кочкарёв, В. И. Бабич // Бетон и железобетон в Украине. – 2013. – № 3. – С. 21–26.
- [6] Modul Massivbau 1. Bachelor Wi-Ing. Teil 1: Grundlagen [Electronic resource] / M. Rösler. – Berlin : Beuth Hochschule für Technik. – S. 15. – Access mode: http://public.beuth-hochschule.de/~roeslerm/Skript/WiIng_Massivbau1_Grundlagen.pdf – Назва з екрана.
- [7] MacGregor J. G. Reinforced Concrete : mechanics and design [Electronic resource] / James G. MacGregor, James K. Wight. – New Jersey : Upper Saddle River, 2005. – 1132 p. – Access mode: <http://www.twirpx.com/file/89289/> – Назва з екрана.
- [8] Опір матеріалів: підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Є. С. Уманський ; ред. Г. С. Писаренко. – 2-ге вид., доп. і перероб. – К. : Вища шк., 2004. – 655 с. : іл.

Надійшла до редколегії 26.02.2016 р.