

Лекція 11. Основи конструювання ЗБК

Під час проектування залізобетонних елементів потрібно забезпечити не тільки їхню міцність і стійкість (граничний стан першої групи), але і достатню жорсткість, а здебільшого і тріщиностійкість (граничний стан другої групи).

Тріщини у залізобетонних елементах можуть бути спричинені навантаженням, зміною температури або усадкою.

Тріщини знижують жорсткість елемента, порушують його монолітність, погіршуючи експлуатаційні якості і довговічність.

Тріщиностійкістю звичайних і попередньо-напружених залізобетонних елементів у стадії Іа називають їхню опірність утворенню тріщин.

За утворенням або за розкриттям тріщин розраховують елементи, в яких за умовами експлуатації утворення тріщин не допускається або розкриття їх повинно бути обмежено.

Розрахунок за деформаціями необхідний для елементів, деформація яких за умовами експлуатації повинна бути обмежена.

Теорію розрахунку залізобетонних елементів за тріщиностійкістю і деформаціями, розроблену радянськими і українськими вченими (В.І. Мурашовим, А.А. Гвоздьовим, А.Б. Голишевим і ін.), використовують для розрахунку звичайного і попередньо-напруженого залізобетону.

11.1 Розрахунок за утворенням тріщин

Розрахунок елементів за утворенням тріщин виконують на зусилля, яке виникає від зовнішніх навантажень у сполученні із зусиллями від попереднього напруження елемента. При тому розрахунок виконують за утворенням тріщин як нормальних, так і похилих до повздовжньої осі елемента.

Для згинальних, розтягнутих і позацентрово-стиснених залізобетонних елементів зусилля, що сприймається нормальними до повздовжньої осі перерізами під час утворення тріщин, визначають, враховуючи такі припущення:

- перерізи після деформації залишаються плоскими;
- найбільше відносне видовження крайнього розтягнутого волокна бетону рівня $2R_{bt,ser}/E_b$;
- напруження у бетоні стисненої зони (якщо вона є) визначається з урахуванням пружних деформацій, але для позацентрово-стиснутих елементів і згинальних попередньо-напружених елементів також з врахуванням напружених деформацій бетону;
- непружні деформації враховують зменшенням ядрової відстані g ;

- напруження у бетоні розтягнутої зони розподілені рівномірно і дорівнюють $R_{bt,ser}$;
- напруження у ненапруженій арматурі дорівнюють алгебраїчній сумі оточуючого бетону і напружень, спричинених усадкою і повзучістю бетону;
- напруження у напруженій арматурі дорівнюють алгебраїчній сумі її попереднього напруження (із врахуванням всіх втрат) і напруження, що відповідає приросту пружних деформацій оточуючого бетону.

Ці положення (припущення) не розповсюджуються на елементи, які розраховані на дію навантаження, що багаторазово повторюється.

У разі визначення зусиль, що сприймають перерізи елементів із попередньо напруженою арматурою без анкерів на довжині зони передавання напруження l_p (див. п. 23.4, роз.23) під час розрахунку за утворенням тріщин, повинно враховуватись пониження попереднього напруження у арматурі σ_{sp} і σ'_{sp} множенням на коефіцієнт умов роботи арматури γ_{s5} .

1. Розрахунок на утворення тріщин, нормальних до повздовжньої осі елемента. У елементах, які піддаються дії осьових зусиль, зовнішні сили спричиняють осьовий розтяг елемента, а попереднє напруження – осьовий стиск. У таких випадках працюють нижні пояси ферм, затяжки арок, стінки труб або резервуарів тощо.

Умова тріщиностійкості попередньо-напружених центрально-обтиснутих залізобетонних елементів при центральному розтягу силою N перевіряється із умови:

$$N \leq N_{crc}, \quad (10.1)$$

де N – повздовжня сила від зовнішніх навантажень; N_{crc} – повздовжня внутрішня сила, яка сприймається перерізом, нормальним до повздовжньої осі елемента під час утворення тріщин.

Зусилля N_{crc} можна визначити із таких міркувань.

На стадії I етапу Iб (див.п 6, роз.7) попередній обтиск у бетоні погашається і напруження дорівнюють нулю, у напруженій арматурі напруженню, яке контролюється, мінус втрати ($\sigma_{sp2} = \sigma_{sp} - \sigma_{sn}$), у ненапруженій арматурі – стискальним напруженням, які дорівнюють втратам від усадки і повзучості ($\sigma_s = \sigma_8 + \sigma_9$). У разі збільшення зовнішнього навантаження і переходу елемента до стадії Ia, яка передуює утворенню тріщин, напруження у бетоні зростають від нуля до межі міцності бетону на розтяг $R_{bt,ser}$, а деформації сягають граничного розтягу бетону. Якщо прийняти у середньому граничну розтяжність попередньо-обтисненого бетону такою, що дорівнює $E_{bt} = 0.15 \cdot 10^{-3}$, тоді, приймаючи, що видовження арматури і бетону рівні ($E_{bt} = E_s$), приріст напружень у всій арматурі наближено буде таким:

$$\Delta\sigma_s = E_s \cdot E_s = 2 \cdot 10^5 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} = 30 \text{ МПа}. \quad (10.2)$$

Підсумовуючи зусилля, яке діє у перерізі на стадії I і приріст зусиль, які виникають під час переходу до стадії I одержимо граничне внутрішнє зусилля

$$N_{crc} = R_{bt,ser} \cdot A + (30 - \sigma_s) A_s + (30 + \gamma_{sp} \cdot \sigma_{sp2}) A_{sp} \quad (10.3)$$

де $\gamma_{sp} = 0,9$ – коефіцієнт точності попереднього напруження арматури; $R_{bt,ser}$ –

опір бетону розтягу для граничних станів другої групи; A – площа перерізу всього елемента; A_s і A_{sp} – площі відповідно ненапруженої і напруженої арматур.

Згідно з формулою (10.3), наявність у перерізі ненапруженої арматури призводить до зниження тріщиностійкості елемента, оскільки звичайно $\sigma_s > 30 \text{ МПа}$.

$$N_{crc} = R_{bt,ser} (A + 2\nu A_s) + P, \quad (10.4)$$

де A_s – площа перерізу ненапруженої і напруженої повздовжньої арматури; P – зусилля попереднього обтиску, яке визначається згідно з вказівками п.5 підрозділу 3 роз.7; $\nu = E_s/E_b$.

Тріщиностійкість елемента, який працює на згин, позацентровий стиск і позацентровий розтяг розраховують на основі таких припущень (рис.10.1):

- 1) у розрахунку вводимо приведений переріз A_{red} ;
- 2) рівнодійну зусиль всієї повздовжньої арматури

$$P = \sigma_{sp} A_{sp} + \sigma'_{sp} A'_{sp} - \sigma_s A_s - \sigma'_s A'_s.$$

враховують як зовнішню силу, яка обтискує приведений переріз. Для звичайного залізобетону у цій формулі $A_{sp} = A'_{sp} = 0$;

- 3) приймаємо гіпотезу плоских перерізів ;

4) розрахункову епюру напружень у перерізі на стадії Іа, яка передують утворенню тріщин у бетоні, приймають у стисненій зоні трикутною, а у розтягненій прямокутною з напруженням, що дорівнює нормативному опору бетону на розтяг $R_{bt,ser}$ або розрахунковому опору бетону на розтяг $R_{bt,ser}$ для граничного стану другої групи.

Розрахунок згинальних, позацентрово-стиснених, а також позацентрово-розтягнених елементів за утворенням тріщин виконують за умови

$$M_r \leq M_{crc}, \quad (10.5)$$

де M_r – момент зовнішніх сил, розташованих з одного боку від перерізу, який розглядаємо, щодо осі, паралельної від нульової лінії і яка проходить через ядрову точку, найвіддаленішу від розтягнутої зони, тріщиноутворення якої перевіряють;

M_{crc} – момент, що сприймається перерізом, нормальним до повздовжньої осі елемента, у разі утворення тріщин і який визначають за формулою

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl} \pm M_{rp}. \quad (10.6)$$

Тут M_{rp} – момент зусилля P щодо тієї самої осі, що і для визначення M_r ;

Знак моменту визначається напрямком повороту (“+” – коли напрямки повороту моменту M_{rp} і M_r протилежний; “-” – коли напрямки збігаються).

Зусилля P розглядають: для попередньо-напружених елементів – як зовнішню стискальну силу; для елементів, що виготовляють без попереднього напруження, – як зовнішню розтягувальну силу, що визначається за формулою (23.17), приймаючи напруження σ_s і σ'_s у напруженій арматурі числово такими, що дорівнюють значенню втрат від усадки бетону $\sigma_b \cdot R_b$.

Значення M_r визначають за формулами: для згинальних елементів (рис. 10.1, а)

$$M_r = M; \quad (10.7)$$

для позацентрово-стиснених елементів (рис.10.1, b)

$$M_r = N(e_0 - r); \quad (10.8)$$

для позацентрово-розтягнених елементів (рис.10.1, c)

$$M_r = N(e_0 + r). \quad (10.9)$$

Значення M_{rp} визначають за такими формулами:

Під час розрахунку за утворенням тріщин у зоні перерізу, розтягнутої від дії зовнішнього навантаження, але стисненого від дії зусилля попереднього обтиску

$$M_{rp} = P(e_{op} + r) \quad (10.10)$$

Під час розрахунку за утворенням тріщин у зоні перерізу розтягнутої від дії

$$M_{rp} = P(e_{op} - r). \quad (10.11)$$

2. Розрахунок за утворенням тріщин, нахилених до повздожньої осі елемента. Тріщиностійкість на похилених перерізі перевіряють у найнебезпечніших перерізах за довжиною прольоту залежно від виду епюри поперечних сил і епюри згинальних елементів, а також у разі зміни висоти або ширини перерізу за висотою перерізу. Таку перевірку виконують на рівні центра ваги приведенного перерізу і у місцях зміни ширини перерізу.

Розрахунок за утворенням тріщин, нахилених до повздожньої осі елемента повинен виконуватись за умови:

$$\text{при } \sigma_{ms} \leq \gamma_{bu} R_{b,ser}; \quad \sigma_{mt} \leq R_{bt,ser}; \quad (10.12)$$

$$\text{при } \sigma_{ms} > \gamma_{bu} R_{b,ser}; \quad \sigma_{mt} \leq \frac{R_{bt,ser}}{1 - \gamma_{bu}} \left(1 - \frac{\sigma_{mc}}{R_{bt,ser}} \right), \quad (10.13)$$

де γ_{bu} – коефіцієнт умов роботи бетону, який визначають за формулою $\gamma_{bu} = 0.8 - 2B$; але не більше 0,5; тут 2 для важкого бетону рівня 0,01, для дрібнозернистого, легкого і коміркового бетонів – 0,02; В – клас бетону за міцністю на стиск, МПа.

Значення головних розтягу вальних і головних стискальних напружень у бетоні σ_{mt} і σ_{ms} визначають за формулою

$$\sigma_{mt}, \sigma_{ms} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (10.14)$$

де σ_x – нормальне напруження у бетоні на площині, перпендикулярній осі елемента, від зовнішнього навантаження і зусилля попереднього обтиску; σ_y – нормальне напруження у бетоні на площині, нормальній повздожній осі елемента, від місцевої дії опорних реакцій, зосереджених сил і розподіляючого навантаження, а також зусилля обтиску внаслідок попереднього напруження хомутів і відігнутих стрижнів; τ_{xy} – дотичні напруження у бетоні від зовнішнього навантаження і зусилля обтиску внаслідок попереднього напруження відігнутих стрижнів.

Напруження σ_x , σ_y , τ_{xy} визначаються як для пружного тіла.

Напруження σ_x і σ_y підставляють у формулу (10.14) зі знаком “+”, якщо вони розтягуювальні і зі знаком “-”, якщо стискальні, напруження σ_{ms} в умовах

(10.12) і (10.13) приймають за абсолютною величиною.

Умови (10.12) і (10.13) перевіряють у центрі ваги приведенного перерізу і у місцях примикання стиснених полицок до стінки елемента таврового і двотаврового перерізів.

Під час розрахунку елементів з попередньо-напруженою арматурою без анкерів повинно враховуватись зниження попереднього напруження σ_{sp} і σ'_{sp} на довжині зони переда напруження множенням на коефіцієнт σ_{s5} .

Нормальне напруження σ_x визначають як суму напружень від зовнішнього моменту і напруження бетону,

$$\sigma_x = (M/I_{red})y + \sigma_{bp}, \quad (10.15)$$

де σ_{bp} – встановлене попереднє напруження у бетоні перед навантаженням елемента; y – відстань від волокна, яке розглядаємо, до центра ваги приведенного перерізу.

Нормальне напруження у бетоні l напрямку, перпендикулярному до поздовжньої осі елемента, зумовлене попереднім напруженням хомутів або відгинів,

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{s\omega} A_{sp} \omega}{S \omega | b} + \frac{\sigma_{sp,inc} A_{sp,inc}}{S_{inc} | b} \sin Q, \quad (10.16)$$

де $A_{sp\omega}$ – площа перерізу всіх напружених хомутів, розташованих у одній нормальній до осі елемента площині на ділянці, що розглядається. $A_{sp,inc}$ – площа перерізу напруженої відігнутої арматури, яка закінчується на ділянці завдовжки $S = 0.5h$, розташованому симетрично щодо перерізу, який розглядається $0 - 0$ (рис.8.3); $\sigma_{s\omega}$ і $\sigma_{sp,inc}$ – попереднє напруження за врахуванням всіх втрат відповідно у поперечній арматурі (хомутах) і у відігнутій арматурі; S_ω – крок хомутів; b – ширина перерізу на рівні, який розглядаємо; S_{inc} – крок відігнутих стрижнів.

Під час визначення σ_y у деяких випадках, згідно з вказівками норм, варто враховувати також напруження від місцевого стиску, що виникає поблизу місць прикладання опорних реакцій і зосередженого навантаження.

Дотичні напруження у бетоні

$$\tau_{xy} = QS_{red} / \tau_{red} b, \quad (10.17)$$

де Q – поперечна сила; S_{red} – приведений статичний момент частини перерізу, розташованої нижче або вище від рівня, який розглядаємо відносно осі, що проходить через центр ваги перерізу.

Поперечну силу Q визначають як різницю або суму поперечних сил від зовнішнього навантаження Q_b і сили напруження Q_p

$$Q = Q_b - Q_p = Q_b - P \sin Q, \quad (10.18)$$

де P – зусилля у напруженій арматурі, що закінчується на ділянці між опорою і перерізом, який розташований на відстані h/u від перерізу; Q – кут між відігне-

мою арматурою і повздовжньою віссю елемента у перерізі.

Попереднє напруження значно зменшує безпеку утворення нахилених тріщин. Так, якщо у звичайному залізобетоні, підставляючи у формулу (10.14) $\sigma_x = \sigma_y = 0$, знаходимо, що головні розтягувальні напруження на нульовій осі $\sigma_{mt} = \tau_{xy}$, тоді за наявності попереднього обтиску бетону у повздовжньому напрямку напруженням $\sigma_{bp} = \tau_{xy}$, підставляючи у формулу (10.14) $\sigma_x = \tau_{xy}$ і $\sigma_y = 0$, одержимо $\sigma_{mt} = -0.62 \tau_{xy}$, тобто головні розтягувальні напруження зменшуються на 38%. Якщо створити обтиск бетону у двох напрямках з напруженнями $\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy}$, тоді головні розтягувальні напруження перетворяться в нуль.

11.2 Розрахунок за розкриттям

Розрахунок за розкриттям тріщин виконують для центрально- і позацентрово-розтягнених, згинальних і позацентрово-стиснутих (у разі великих ексцентриситетів) залізобетонних елементів, які знаходяться в умовах агресивного середовища або під тиском рідини.

Такий розрахунок необхідний для залізобетонних силосів, димових труб і конструкцій будівель і споруд (не захищених від атмосферних впливів, що знаходяться в умовах підвищеної вологості повітря або тих, які піддаються дії повторного динамічного навантаження), утворення тріщин у яких допускається, але повинно бути обмежене їхнє розкриття. Розрахунок на розкриття тріщин виконують на дію нормативних навантажень на стадії II напружено-деформованого стану для нормальних і нахилених перерізів елемента. Максимальна ширина розкриття нормальних і нахилених тріщин обмежується залежно від виду арматури і умов роботи конструкції.

Під час експлуатації залізобетонних конструкцій, до яких висувають вимоги 2-ї і 3-ї категорій тріщиностійкості, не тільки допускається утворення тріщин, але і розкриття їх до певної нормативної ширини.

Вимоги до тріщиностійкості залізобетонних конструкцій залежно від умов їх роботи і виду арматури, а також значення гранично-допустимої ширини розкриття тріщин для елементів, що експлуатуються в умовах неагресивного середовища, наведені у табл. 10.1.

Якщо у конструкціях або їхніх частинах, до тріщиностійкості яких висувані вимоги 2-ї і 3-ї категорій тріщиностійкості, тріщини не утворюються, їх розрахунок на тимчасове недовготривале розкриття і на закриття тріщин (для 2-ї категорії) або на недовготривале і довготривале (для 3-ї категорії) не виконується.

Під недовготривалим розкриттям тріщин розуміють їхнє розкриття за дії постійних, довготривалих і короткочасних навантажень, а під довготривалим – тільки постійних, довготривалих навантажень.

Зазначені вище категорії вимог до тріщиностійкості залізобетонних конструкцій стосуються тріщин, нормальних і нахилених до повздовжньої осі елемента.

Для запобігання розкриття повздовжніх тріщин потрібно вживати конс-

труктивних заходів (встановлення відповідної поперечної арматури), а для попередньо-напружених елементів значення стискальних напружень у бетоні на стадії попереднього обтиску повинні бути обмежені величиною $\sigma_{bp} = (0.45 - 0.95)R_{bp}$ (див. табл.23.2).

1. Розрахунок за розкриттям тріщин, нормальних до повздовжньої осі елемента. Ширину розкриття тріщин, мм, нормальних до повздовжньої осі елемента, на рівні центра ваги розтягнутої арматури визначають за емпіричною формулою

$$A_{crc} = \delta \varphi_i \eta (\sigma_s / E_s) 20 (3.5 - 100\mu) 3\sqrt{d}, \quad (10.19)$$

де δ – коефіцієнт для згинальних і позацентрово-стиснутих елементів, приймають таким, що дорівнює 1, для розтягнутих елементів – 1,2; φ_i – коефіцієнт, який приймають таким, що дорівнює враховуючи: короточасні навантаження і недовготривалу дію постійних і довготривалих навантажень – 1, багатократно повторних навантажень, а також довготривалої дії постійних і довготривалих навантажень для конструкцій із бетонів: важкої природної вологості $\varphi_i = 1.6 - 1.5$ м; у водонасиченому стані – 1,2; дрібнозернистої групи : $A = 1.75$; $B = 2,0$; $B = 1.5$; легкої – не менше -1,5; коміркового – 2.5; η – коефіцієнт, який приймають таким, що дорівнює у разі стрижневої арматури періодичного профілю – 1; гладкої – 1,3; за дротяної арматури періодичного профілю і канатів – 1,2 ;гладкої – 1,4; σ_s – напруження у стержнях крайнього ряду арматури S або (за наявності попереднього напруження) приріст напружень від дії зовнішнього навантаження, яке визначають за формулами (8,21) і (8,22); μ – коефіцієнт армування перерізу, який приймається таким, що дорівнює площі перерізу арматури S до площі перерізу бетону (за робочої висоти h_0 і без врахування стиснених зв'язів полицок), але не більше 0,02; d – діаметр арматури, мм.

Для елементів, до тріщиностійкості яких висунуто вимоги 2-ї категорії, ширину розкриття тріщин визначають від сумарної дії постійного, довготривалого і короточасного навантажень при коефіцієнті $\varphi_i = 1$.

Для елементів, до тріщиностійкості яких висунуто вимоги 3-ї категорії, ширину розкриття тріщин визначають від дії постійного і довготривалого навантаження за коефіцієнта $\varphi_i > 1$. Ширину недовготривалого розкриття тріщин визначають як суму ширини довготривалого розкриття і приросту ширини розкриття від дії короточасного навантаження, яке визначають за коефіцієнта $\varphi_i = 1$.

Напруження у розтягнутій арматурі (або приріст напружень) σ_s потрібно визначатись за формулами:

Для центрально-розтягнутих елементів

$$\sigma_s = (N - P) / A_s; \quad (10.20)$$

для згинальних елементів

$$\sigma_s = [M - P(z - e_{sp})] / A_s z; \quad (10.21)$$

для позацентрово-стиснених, а також позацентрово-розтягнутих при $e_{0,tot} \geq 0.8h_0$

$$\sigma_s = [N(e_s \pm z) - p(z - e_{sp})] / A_s \cdot Z. \quad (10.22)$$

Таблиця 10.1 Гранично-допустима ширина розкриття тріщин

Умови роботи конструкції	Категорія вимог до тріщиностійкості з/б конструкцій і гранично-допустима ширина недовготривалого a_{crc1} і довготривалого a_{crc2} розкриття тріщин, мм, за стрижневої арматури класів		
	А-I, А-II, А-III, А-IIIb і дроту Вр-I	А-IV, А-V і д्रो-тяної В-II, Вр-II, К-7 за діаметра дроту 4 мм і бі-льше	А-VI і д्रो-тяної В-II, Вр-II, К-7, К-19 за діаметра дроту менше 4 мм
Елементи, що сприймають тиск рідини або газів: а) у разі повністю розтягнутого пе-рерізу	3 категорія $a_{crc1}=0,2$ $a_{crc2}=0,1$	I категорія	I категорія
б) у разі частково стисненого перері-зу	3 категорія $a_{crc1} = 0,3$ $a_{crc2} = 0,2$	3 категорія $a_{crc1} = 0,3$ $a_{crc2} = 0,2$	II категорія $a_{crc1} = 0,1$
Елементи складів сипких тіл, безпо-середньо сприй-маючих їхній тиск	3 категорія $a_{crc1} = 0,3$ $a_{crc2} = 0,2$	3 категорія $a_{crc1} = 0,3$ $a_{crc2} = 0,2$	II категорія $a_{crc1} = 0,1$
Інші елементи	3 категорія $a_{crc1} = 0,4$ $a_{crc2} = 0,3$	3 категорія $a_{crc1} = 0,4$ $a_{crc2} = 0,3$	II категорія $a_{crc1} = 0,15$

Для позацентрово-розтягнутих елементів при $e_{0,tot} < 0.8h_0$ значення σ_s ви-значають за формулою (10.22), приймаючи z таким, що дорівнює z_s – відстань між центрами ваги арматури S і S' .

Для елементів, що виготовляються без попереднього напруження арма-тури, значення зусилля попереднього обтиску P приймається таким, що дорів-нює нулю.

У арматурі (10.22) знак “+” – приймають при позацентровому розтягу, а знак “-” – при позацентровому стиску. У разі розташування розтягувальної повздовжньої сили N між центрами ваги арматури S і S' значення e_s приймаєть-ся зі знаком “-”.

У формулах (10.21) і (10.22): Z – відстань від центра ваги площі перерізу арматури до точки прикладання рівнодійної зусиль у стисненій зоні перерізу над тріщиною, яке визначається за формулою (10.54).

У разі розташування розтягнутої арматури у декілька рядів за висотою перерізу у згинальних, позацентрово-стиснених, а також позацентрово-розтягнутих при $e_{0,tot} \geq 0.8h_0$ елементах напруження σ_s , підраховані за формула-

ми (10.21) і (10.22), потрібно множити на коефіцієнт δ .

$$\delta = (h - x - a_2)/(h - x - a_1), \quad (10.23)$$

де $x = \xi h_0$; ξ – визначається за формулою (8.55); a_1 і a_2 – відстань від центра ваги площі перерізу арматури S відповідно всієї і крайнього ряду стрижнів до найбільше розтягнутого волокна бетону.

Значення напружень $\sigma_s + \sigma_{sp}$, а при багаторядній арматурі $\delta\sigma_s + \sigma_{sp}$ не повинно перевищувати $R_{s,ser}$.

2. Розрахунок за розкриттям тріщин, нахилених до повздовжньої осі елемента. Ширину розкриття тріщин, нахилених до повздовжньої осі елемента у згинальних елементах, армованих поперечною арматурою, визначають за емпіричною формулою

$$A_{rc} = \varphi_i \frac{1.3\sigma_s \omega d_{\omega} l}{E_s \frac{d_{\omega}}{h_0} + 0.3E_b (1 + 2\nu\mu_{\omega})} \quad (10.24)$$

де φ_i – коефіцієнт, який приймають таким, що дорівнює враховуючи короткочасні навантаження і недовготривалу дію постійних і довготривалих навантажень – 1; багаторазово повторні навантаження, а також довготривалу дію постійних і довготривалих навантажень для конструкцій із бетону: важкого природної вологості – 1,5; у водонасиченому стані – 1,2; дрібнозернистої групи: А = 1,75; Б = 2; В = 1,5; легкого – не менше 1,5; коміркового – 2,5; η – також, що і у формулі (8,19); ν і μ_{ω} – позначення ті самі, що і у формулі (3,76); d_{ω} – діаметр хомутів; $\sigma_{s\omega}$ – напруження у хомутах, яке визначається за формулою

$$\sigma_{s\omega} = [(Q - Q_{\delta i}) / A_{s\omega} h_0] S, \text{ але не більше } R_{s,ser}. \quad (10.25)$$

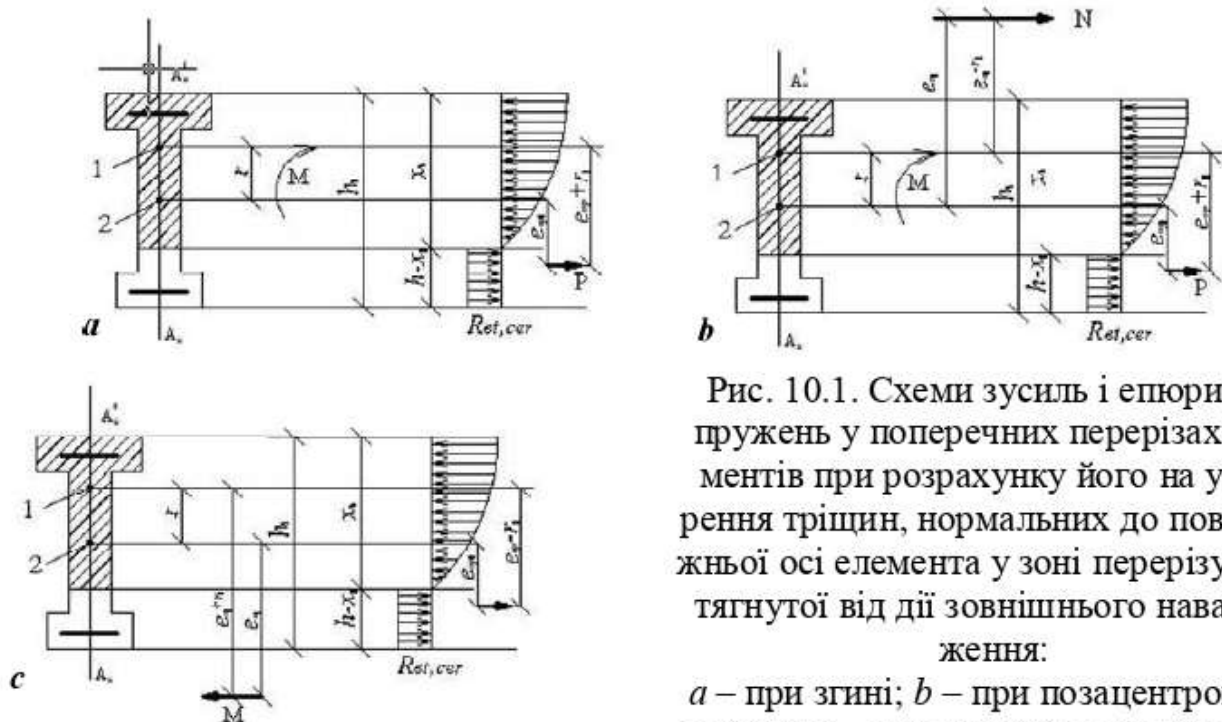


Рис. 10.1. Схеми зусиль і епюри напружень у поперечних перерізах елементів при розрахунку його на утворення тріщин, нормальних до повздовжньої осі елемента у зоні перерізу, розтягнутої від дії зовнішнього навантаження:

a – при згині; *b* – при позацентровому стиску; *c* – при позацентровому розтягу; 1 - ядрова точка; 2 - центр ваги приведеного перерізу.

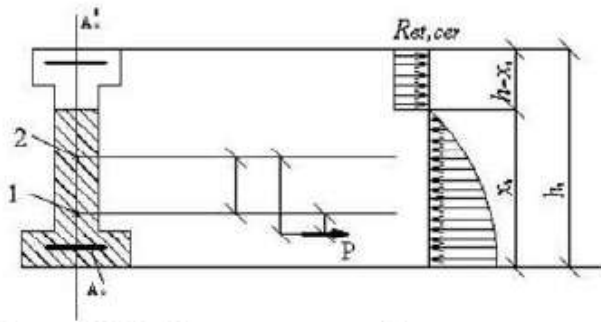


Рис. 10.2. Схема зусиль і еюра напружень у поперечному перерізі елемента при розрахунку його на утворення тріщин, нормальних до повздовжньої осі елемента, у зоні перерізу, розтягнутої від дії зусиль попереднього обтиску: 1 - ядра точка; 2 — центр ваги приведенного перерізу.

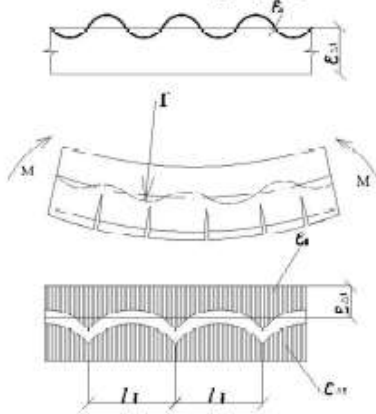


Рис. 10.4. Залізобетонний елемент, підданий чистому згину, після появи тріщин у розтягнутій зоні.

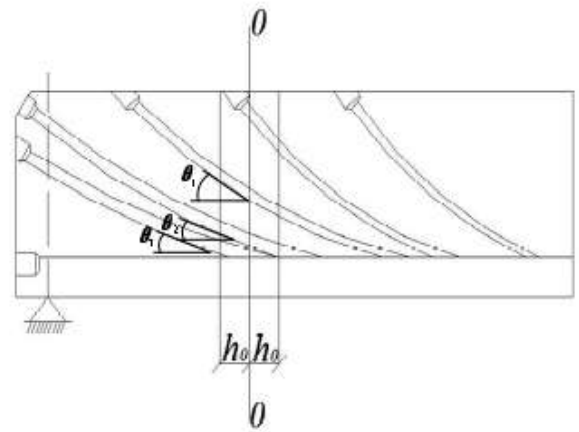


Рис. 10.3. Схема розташування арматури, яка враховується при розрахунку перерізу 0-0 на головні розтягуючі напруження.

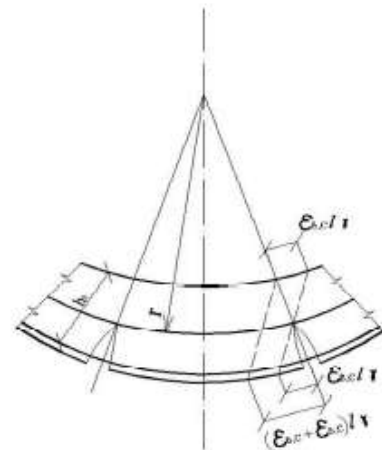


Рис. 10.5. До розрахунку деформацій елементів, які працюють з тріщинами у розтягнутій зоні

Тут Q – поперечна сила, яка сприймається елементами без поперечної арматури і визначається із заміни R_{bt} на $R_{bt,ser}$; $R_{bt,ser}$ не повинно перевищувати значення, відповідного бетону класу В30; Q_{bl} поперечна сила від зовнішнього навантаження, яка розташована по один бік нахилоного перерізу, що розглядається.

Розраховують для найнебезпечнішого нахилоного перерізу.

Для елементів із легких бетонів класів В7,5 і нижче значення A_{crc} обчислене за формулою (10.24) множать на коефіцієнт 1,3.

11.3 Розрахунок попередньо-напружених елементів на закриття тріщин

На закриття тріщин розраховують тільки попередньо напружені елементи, до яких висувають вимоги 2-ї категорії тріщиностійкості. У таких елементах за повного нормативного навантаження допускається обмежене за шири-

ною короткочасне розкриття нормальних і нахилених тріщин. Однак, у разі дії навантажень, які доволі часто трапляються, такі тріщини повинні бути надійно закритими (затисненими).

Залізобетонні елементи потрібно розраховувати на закриття (затиснення) нормальних і нахилених тріщин.

1. Розрахунок на закриття тріщин, нормальних до повздовжньої осі елемента.

У згинальних, позацентрово-стиснених і позацентрово-розтягнених елементах нормальні тріщини вважаються надійно закритими, якщо за дії навантаження, що часто трапляється, переріз залишається затисненим. При тому:

а) у напруженій арматурі S від дії постійних, довготривалих і короткочасних навантажень не повинні виникати необернені деформації, що забезпечуються дотриманням умови

$$\sigma_{sp} + \sigma_s \leq 0,8 R_{s,ser}, \quad (10.26)$$

де σ_s – приріст напруження у напруженій арматурі S від дії зовнішніх навантажень, яке визначається за формулами (10.20) – (10.22).

б) переріз елемента з тріщиною у розтягненій зоні від дії постійних, довготривалих і короткочасних навантажень повинно залишатися затисненим у разі дії постійних і довготривалих навантажень з нормальними напруженнями стиску σ_b на розтягненій зовнішній навантаженням грані елемента не менше 0,5 МПа, при тому величину σ_b визначають як для пружного тіла від дії зовнішніх навантажень і зусилля попереднього обтиску.

2. Розрахунок на розкриття тріщин, нахилених до повздовжньої осі елемента. Для забезпечення надійного закриття нахилених тріщин обидва головні напруження, що визначаються за формулою (10.14) на рівні центра ваги приведенного перерізу, повинні бути стискальними і не менше 0,5 МПа, тобто повинна бути збережена умова

$$\sigma_{mt} = (\sigma_x + \sigma_y) / 2 \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y) / 2)^2 + \tau_{xy}^2} \geq 0,5 \text{ МПа}. \quad (10.27)$$

Цю вимогу можна виконати за допомогою попереднього напруження поперечної арматури (хомутів або відігнених стрижнів).

11.4 Розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за деформаціями

1. Загальні відомості. Жорсткість елемента необхідно знати для визначення деформацій (прогинів і кутів повороту), а також під час визначення частоти власних коливань, температурних зусиль та зусиль, що виникають під час осадки опор і тощо.

Розрахунок за деформаціями має дуже велике значення у зв'язку з широким використанням у будівництві збірного залізобетону із високоміцних матеріалів. Використання міцніших бетонів, а також тенденція до зменшення маси збірних конструкцій зумовлює зменшення розмірів і, як наслідок, зниження жорсткості. Використання високоміцних сталей з підвищеними напруженнями

під час експлуатаційного навантаження також приводить до зниження жорсткості, і як наслідок, до збільшення прогинів.

Відомо, що визначення деформацій елементів, які розглядають під час розрахунку як суцільні пружні тіла (наприклад, сталевих), зазвичай не становить труднощів, оскільки їхня жорсткість постійна і не змінює свого значення від розмірів навантаження і часу їх дії.

Залізобетонні згинальні елементи під час експлуатаційного навантаження, як зазвичай, працюють з тріщинами у бетоні розтягнутої зони, і на їх деформації і напруження впливає багато факторів (статична схема і геометричні розміри елементів, розмір і характер навантаження, пружні і пластичні властивості бетону і арматури, утворення і розкриття тріщин у розтягненій зоні бетону тощо). Багато із цих факторів є у взаємозв'язку і впливають один на одного. Отже, розрахунок деформацій за наявності тріщин є дуже складним завданням.

У 1940 р. радянський вчений професор В.І. Мурашов вперше запропонував теорію розрахунку жорсткості і розкриття тріщин у згинальних залізобетонних елементах, які працюють з тріщинами у бетоні розтягнутої зони. Він принципово правильно врахував вплив тріщин на жорсткість залізобетонних елементів і зв'язав розрахунок жорсткості і розкриття тріщин у єдину теорію.

У подальшому Я.І. Немировський, А.Б. Голишов, А.Я. Барашиков, А.М. Бамбура, Й.Й. Лучко та багато інших виконали обширні експерименти, які дали змогу перевірити та уточнити теорію.

За пропозицією А.А. Гвоздєва деякі положення теорії жорсткості було переглянуто і уточнено у відповідно до результатів експериментів, виконаних в багатьох науково-дослідних інститутах та навчальних закладах.

Розрахунок за деформацією зводиться до визначення прогинів, кутів повороту і амплітуди коливання за формулами будівельної механіки від не вигідних сполучень навантаження, які не повинні перевищувати граничних значень деформацій, що встановлені нормами.

Прогини елементів залізобетонних конструкцій не повинні перевищувати гранично допустимих значень, встановлених із врахуванням таких вимог:

а) технологічних (умови нормальної роботи кранів, технологічних установок, машин, обладнання тощо).

б) конструктивних (вплив сусідніх елементів, які обмежують деформації певних нахилів тощо).

в) естетичних (уява та думка людей про придатність конструкції).

Значення гранично-допустимих прогинів наведені у табл. 10.2.

Розрахунок за деформаціями потрібно виконувати, у разі обмеження технологічними або конструктивними вимогами – на дію постійних, довготривалих і короткочасних навантажень; у разі обмеження естетичними вимогами – на дію постійних і довготривалих навантажень коефіцієнт надійності за навантаженням приймають таким, що дорівнює одиниці.

У разі дії постійних, довготривалих і короткочасних навантажень прогин у всіх випадках не повинен перевищувати $1/150$ прольоту балок або плит і $1/17$ вильоту консолі.

Таблиця 10.2 Гранично-допустимі прогини

Елемент конструкції	Гранично-допустимий прогин
1. Підкранові балки при кранах: а) ручних б) електричних	1/500 1/600
2. Переkritтя із плоскою стелею і покриттям (за винятком вказаним) при прольотах, М: а) $l < b$ б) $b \leq l = 7,5$ в) $l > 7,5$	1/200 3 см 1/250
3. Переkritтя з ребристою стелею, елементи сходів при прольотах, м: а) $l < 5$ б) $5 \leq l \leq 10$ в) $l > 10$	1/200 2.5 см 1/400
4. Переkritтя сільськогосподарських будівель виробничого призначення при прольотах, м: а) $l < b$ б) $b \leq l \leq 10$ в) $l > 10$	1/150 4 см 1/250
5. Навісні стінові панелі (при розрахунку із площини) при прольотах, м: а) $l < b$ б) $b \leq l = 7.5$ в) $l > 7.5$	1/200 3 см 1/250

l – проліт балок або плит: для консолей приймають значення, що дорівнює подвоєному вильоту консолі.

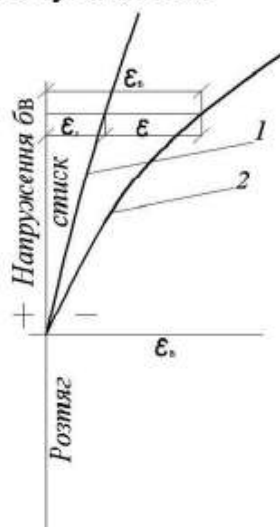


Рис. 10.6. Залежність між напруженнями і деформаціями у бетоні: 1 – пружні деформації; 2 – повні деформації



Рис. 10.7. Діаграма для арматури, яка знаходиться у розтягнутій зоні бетону і для вільного металу

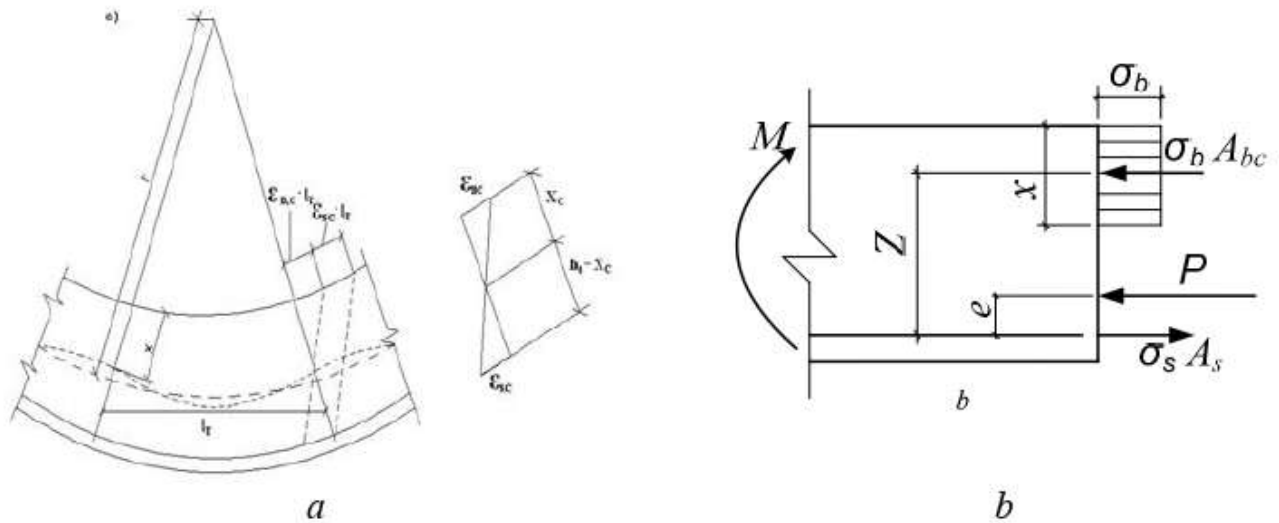


Рис. 10.8. До розрахунку кривизни елемента:
a – деформація згинаючого елемента; *b* – схема діючих зусиль
в розрахунковому перерізі

Гранично-допустимі прогини можна збільшити на висоту будівельного підйому, якщо це обмежено технологічними вимогами.

Для не зв'язаних із сусідніми елементами плит перекриття, сходових маршів, площадок тощо, потрібно застосовувати додаткову перевірку на гнучкість: додатковий прогин від короточасної дії зосередженого навантаження 1000Н у разі найневигоднішої його схеми прикладання повинен бути не більше 0,7мм.

Деформації істотно залежать від того, чи є тріщини у розтягненої зоні чи ні. Тому, для кожного із цих випадків розроблені різні способи визначення жорсткості. З появою тріщин жорсткість різко падає і деформації залізобетонних елементів зростають.

Кривизну і деформації залізобетонних елементів відраховують від їх часткового стану за наявності попереднього напруження – від стану до обтиску.

Початкову кривизну само напружених елементів визначають із врахуванням кількості і врахування повздовжньої арматури щодо бетонного перерізу і розміру обтиску бетону.

Кривизну визначають:

а) для ділянки елемента, де у розтягненій зоні не утворюються тріщини, нормальні до повздовжньої осі елемента – як для суцільного тіла;

б) для ділянки елемента, де у розтягненій зоні є тріщини, нормальні до повздовжньої осі, – як відношення різниці середніх деформацій крайнього волокна стисненої зони бетону і повздовжньої розтягненої арматури до робочої висоти перерізу елемента.

Елементи або ділянки елементів розглядають без тріщин у розтягненій зоні, якщо тріщини не утворюються у разі дії постійних, довготривалих і короточасних навантажень, то навантаження вводять у розрахунок з коефіцієнтом надійності за навантаженням $\gamma_f = 1$.

2. Визначення кривизни залізобетонних елементів на ділянках без тріщин у розтягненій зоні. Під час експлуатації попередньо напружених згинальних елементів 1-ї категорії за тріщиностійкістю і в дуже окремих випадках звичайних залізобетонних згинальних елементах зі слабким армуванням не допускається утворення тріщин у розтягненій зоні бетону.

За відсутності тріщин деформації залізобетонних елементів визначають як для суцільного пружного тіла з врахуванням роботи всієї повздовжньої арматури і бетону стисненої і розтягнутої зон. У розрахунок вводять приведений переріз з моментом інерції I_{red} .

На ділянках, де не утворюються нормальні до повздовжньої осі тріщини, повну кривизну згинальних, позацентрово-стиснених і позацентрово-розтягнених елементів потрібно визначати за формулою

$$(1/r) = (1/r)_1 + (1/r)_2 - (1/r)_3 - (1/r)_4, \quad (10.28)$$

де $(1/r)_1$ і $(1/r)_2$ – кривизни відповідно до короткочасних навантажень і від постійних і довготривалих тимчасових навантажень (без врахування зусилля p), які визначають за формулами

$$(1/r)_1 = M / \varphi_b I E_b f_{red}; \quad (1/r)_2 = M \varphi_b 1 / \varphi_b I E_b I_{red}. \quad (10.29)$$

Тут M – момент від відповідного зовнішнього навантаження (короткочасного, довготривалого) щодо осі, нормальної до площини дії згинального моменту і яка проходить через центр ваги приведенного перерізу; φ_b – коефіцієнт, який враховує вплив короткочасної повзучості бетону і є прийнятний для бетонів: важкого, дрібнозернового, легкого при щільному дрібному заповнювачі, а також пористого (для двошарових попередньо-напружених конструкцій із пористого і важкого бетону) – 0,85; легкого при пористому дрібному заповнювачі, пористого – 0,7; φ_{b2} – коефіцієнт, який враховує вплив довготривалої повзучості бетону на деформації елемента без тріщин, приймають за табл. 10.3; $(1/r)_2$ – кривизна, обумовлена вигином елемента від короткочасної дії зусилля попереднього обтиску p , що визначається за формулою

$$(1/r)_3 = p l_{op} / \iota_{b1} E_b I_{red} \quad (10.30)$$

$(1/r)_4$ – кривизна, зумовлена вигином елемента внаслідок усадки і повзучості бетону від зусилля попереднього обтиску, що визначається за формулою

$$(1/r)_4 = (E_b - E'_b) / h_0 \zeta \quad (10.31)$$

Тут E_b і E'_b – відносні деформації бетону, спричинені його усадкою і повзучістю від зусилля попереднього обтиску, що визначаються відповідно на рівні центра ваги розтягнутої повздовжньої арматури і крайнього стисненого волокна за формулами

$$E_b = \sigma_b / E_s \quad \text{і} \quad E'_b = \sigma'_b / E_s \quad (10.32)$$

Значення σ_b приймають числово таким, що дорівнює сумі втрат попереднього напруження арматури від усадки і повзучості бетону для арматури розтягнутої зони, а σ'_b – також, для напруження арматури, якщо вона є на рівні крайнього стисненого волокна бетону.

Таблиця 10.3 Значення коефіцієнта $\varphi_{\delta 2}$

Навантаження	Коефіцієнт $\varphi_{\delta 2}$, який враховує вплив довготривалої повзучості бетону на деформації елемента без тріщин, для конструкцій із бетону				
	Важкого, легкого, пористого (для двошарових попередньо напружених конструкцій із пористого і важкого бетону)	Дрібнозерниста група			Група пористих
		А	Б	В	
Недовготривала дія навантаження . Довготривала дія навантаження при вологості повітря навколишнього середовища, %	1	1	1	1	1
а) вище 40	2	2.6	3	2	3
б) 40 і нижче	3	3.9	4.5	3	4.5

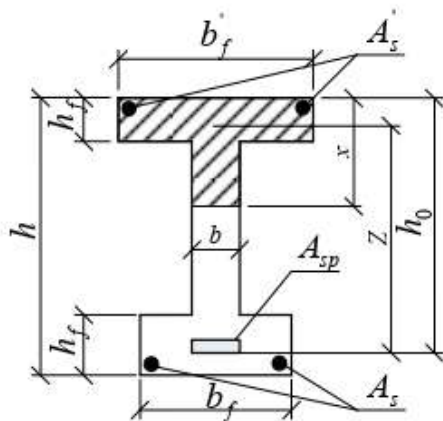


Рис. 10.9. До визначення площі стиснутої зони бетону

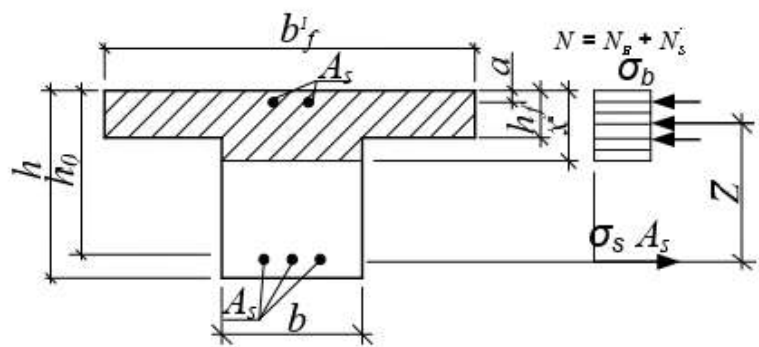


Рис. 10.10. До визначення зусиль в бетоні стиснутої зони для перерізу з тріщиною

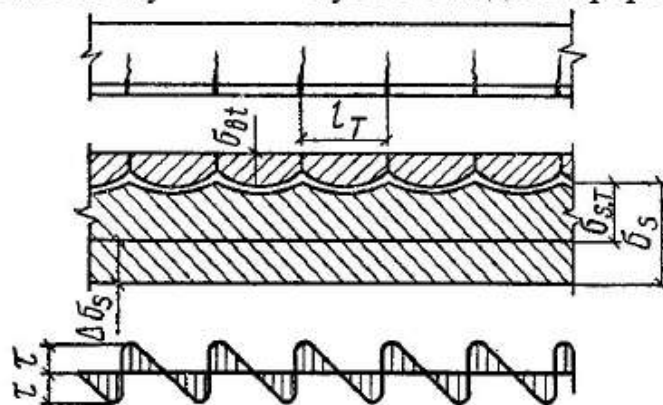


Рис. 10.11. Епюри напружень в розтягнутій зоні згинаючого елемента після появи тріщини

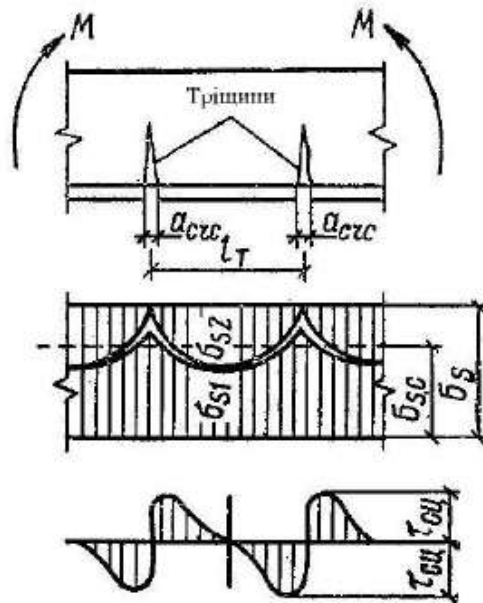


Рис. 10.12. До визначення коефіцієнта ψ_5

Для елементів без попереднього напруження значення кривизни $(1/r)_3$ і $(1/r)_4$ допускається приймати таким, що дорівнює нулю.

На ділянках, де утворюються нормальні тріщини у розтягненій зоні, під час дії навантаження, яке розглядаємо, забезпечено їх закриття, значення кривизни $(1/r)_1$, $(1/r)_2$ і $(1/r)_3$, які входять у формулу (10.28), збільшується на 20%.

3. Визначення кривизни залізобетонних елементів на ділянках з тріщинами у розтягненій зоні. Під час експлуатації у звичайних залізобетонних і попередньо напружених елементах 2-ї і 3-ї категорій тріщиностійкості, які працюють на згин, позацентровий стиск і розтяг, утворюються тріщини у розтягненій зоні. Розрахунок деформацій у цих випадках значно ускладнюються; у теорії Мурашова враховані реальні фізичні властивості залізобетону, зокрема, участь у роботі бетону розтягнутої зони на ділянках між тріщинами, наявність напружених деформацій бетону стисненої зони тощо.

Цей метод розрахунку останніми роками значно удосконалився і поширився на попередньо-напружені позацентрово-стиснені і розтягнені елементи у разі короткочасної і, особливо, довготривалої дії навантаження.

Розглянемо залізобетонний елемент, підданий чистому згину. Після появи тріщин розтягу ця зона елемента буде розділена на окремі блоки, з'єднані зі стисненою зоною і з арматурою (рис.10.4).

Досліди свідчать, що відстань між тріщинами l_T при чистому згині приблизно однакова. Поява тріщин у бетоні розтягнутої зони спричиняє різну зміну в напружено-деформативний стан залізобетонного елемента.

Під час появи тріщин частинки бетону, які раніше були на контакті, розширюються на ширину тріщин перерізу, викривляються і деформації бетону за висотою перерізу змінюються нелінійно.

Напруження у бетоні розтягнутої зони біля тріщин дорівнюватимуть ну-

лю, а у разі віддалення від них, внаслідок зчеплення арматури з бетоном збільшуватимуться. У арматурі, навпаки, напруження у перерізі з тріщиною будуть мати максимальне значення, а по мірі віддалення від неї будуть зменшуватися. Як свідчать вимірювання деформації скорочення бетону стисненої зони також нерівномірні: найбільші над тріщинами і істотно менші над серединою блоків розтягнутої зони. Нейтральна вісь за довжиною ділянки між тріщинами змінює своє положення. Отже, напружений і деформований стан балки, в якій бетон розтягнутої зони пронизаний тріщинами, дуже складний. Однак досліди свідчать, що при чистому згині загальний деформований стан елемента, що має тріщини у розтягненій зоні, визначається середніми відносними деформаціями крайнього волокна стисненої зони бетону і розтягнутої арматури. При тому кривизна елемента і середні крайові деформації пов'язані залежністю (10.5).

$$l_1/r = (\varepsilon_{st} + \varepsilon_{bc}) l_1/h_0$$

або

$$l/r = (\varepsilon_s + \varepsilon_{bc}) / h_0, \quad (10.33)$$

де l/r – кривизна осі елемента; h_0 – корисна висота перерізу; ε_s і ε_{bc} – середнє значення відносного видовження арматури і відносного скорочення крайнього стисненого волокна бетону.

Для бетону залежність напруження – деформація виражається кривою, яка показана на рис.8.8; особливість кривої залежить від швидкості навантаження, часу витримки під навантаженням, класу бетону і його складу, розмірів і форми зразків тощо.

Повна деформація E_b складається із пружних деформацій ε_{pl} і пластичних ε_{pr} :

$$\varepsilon_b = \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{pr}. \quad (10.34)$$

Відношення пружного скорочення бетону до повного позначають $\omega' = \varepsilon_{pl} / \varepsilon_{pr}$. Значення ω' , як свідчать досліди, може змінюватися від максимального ($\omega' = 1$) до мінімального ($\omega' = 0,2$) у разі довготривалої дії навантаження, за даними дослідів значення коефіцієнта ω' при згині близькі до значень ω' при стиску.

Напруження у бетоні можна виразити через повні деформації і модуль пружно пластичного бетону

$$\sigma_b = E'_b \cdot \varepsilon_b. \quad (10.35)$$

Або через пружні деформації і модуль пружності

$$\sigma_b = E_b \cdot \varepsilon_{pr} \quad (10.36)$$

Звідси модулі пружно пластичного бетону при стиску

$$E'_b = \omega' E_b \quad (10.37)$$

І, аналогічно, при розтягу

$$E_{bt} = \omega'_{bt} \cdot E_b \quad (10.38)$$

Середня відносна деформація крайнього стисненого волокна бетону

$$E_{b,c} = \psi_b + E_b = \psi_b \cdot \sigma_b / E_b \omega' \quad (10.39)$$

де ε_b – відносна деформація крайнього стисненого волокна бетону у перерізі з тріщинами; ψ_b – коефіцієнт нерівномірності деформацій крайнього стисненого волокна бетону, дорівнює відношенню середніх деформацій крайнього стисне-

ного волокна до деформацій у перерізі з тріщиною. За даними дослідів $\psi_b = 0.7 \dots 1$; σ_b – напруження у крайньому стисненому волокні бетону у перерізі з тріщиною.

Розглянемо тепер особливість зміни деформацій арматури в бетоні залежно від напружень.

На ділянках між тріщинами, як свідчать досліди, зчеплення між арматурою і бетоном не порушується, і розтягнений бетон, що оточує арматуру, істотно знижує видовження арматури. За невеликих і середніх відсотків армування цей вплив зберігається аж до настання текучості арматури.

Введемо коефіцієнт ψ_s , який враховує роботу між тріщинами, запропонований вперше В.І.Мурашовим:

$$\psi_s = (\varepsilon_{s,c} / \varepsilon_s) = (\sigma_{s,c} / \sigma_s) < 1 \quad (10.40)$$

де $\varepsilon_{s,c}$ і $\sigma_{s,c}$ – середнє відносне видовження арматури і середнє напруження на ділянках між тріщинами; ε_s і σ_s – відносне видовження арматури і її напруження у перерізі з тріщиною.

Коефіцієнт ψ_s змінюється від дуже малих значень (0.2 – 0.3) при тріщинах до одиниці за високих напружень у арматурі, коли зчеплення порушується і розтягнений бетон значною мірою відлучається із роботи.

На рис. 8.7 показана діаграма відносних видовжень арматури, яка є у розтягненій зоні бетону, і діаграма видовжень вільного металу. Як очевидно з цього графіка, особливість зміни деформацій залежно від напруження істотно відрізняється від деформацій вільного металу.

Розтягнена арматура у бетоні має ніби підвищений умовний модуль пружності, середнє його значення

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon = E_s (E_{s,c} / \psi_s) = E_{s,c} \cdot \varepsilon_{s,c} \quad (10.41)$$

де $E_{s,c} = E_s / \psi_s$ – середній умовний модуль пружності арматури, оточений бетоном розтягнутої зони, у якій є тріщини; E_s – модуль пружності арматури (вільного металу).

Знаючи кривизну елемента $1/r$, можна за формулами будівельної механіки обчислити деформації. Тому проаналізуємо формулу (8.33). Розглянемо загальний випадок, коли на елемент діє згинальний момент M разом з повздовжньою стискальною силою N_{tot} , в яку входить також і зусилля попереднього обтиску p з врахуванням всіх втрат

$$N_{tot} = N \pm p. \quad (10.42)$$

Позначимо через M_3 (замінний момент) момент всіх зовнішніх сил (а також зусилля p), прикладених з одного боку перерізу щодо осі, нормальної до площини згину і проходить через центр ваги арматури розтягнутої зони (рис. 10.8):

$$M_3 = M \pm N_{tot} \cdot e_{0\ tot}. \quad (10.43)$$

Для звичайного елемента із звичайного залізобетону (при відсутності повздовжньої сили) замінювальний момент дорівнює згинальному, тобто $M_3 = M$.

Уводячи до розрахунку замінювальний момент замість згинального, ми переносимо рівнодійну повздовжніх зусиль N_{tot} у центр ваги арматури розтягнутої зони. Тому зусилля в стисненому бетоні і розтягненій арматурі відповід-

но будуть дорівнювати: M/z і $M_3/z - N_{tot}$, де z – відстань від центра ваги розтягнутої арматури до точки прикладання рівнодійної зусиль у стисненій зоні перерізу над тріщиною.

Напруження у стисненому бетоні і розтягненій арматурі одержимо, розділивши відповідні зусилля на площу перерізу стисненого бетону $A_{b,c}$ і розтягнутої арматури A_s :

$$\sigma_b = M_3 / z A_{b,c}; \quad (10.44)$$

$$\sigma_b = (M_3 / z - N_{tot}) I / A_s. \quad (10.45)$$

Середнє відносне скорочення стисненої грані на основі формул (10.35), (10.37), (10.39) і (10.44)

$$\begin{aligned} \varepsilon_{b,c} = \psi_b \varepsilon_b = \psi_b (\sigma_b / E'_b) = \psi_b (M_3 / z A_{b,c} \omega' E_b) = \\ = M_3 \psi_b / z A_{b,c} \omega' E_b. \end{aligned} \quad (10.46)$$

Отже, непружні деформації бетону враховуються коефіцієнтом пружності ω' , а нерівномірність розподілу деформацій вздовж елемента – коефіцієнтом ψ_b .

Середнє відносне видовження розтягнутої арматури на основі формул (10.40), (10.41) і (10.45)

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s,c} = \psi_s \varepsilon_s = \psi_s (\sigma_s / E_s) = \psi_s (M_3 / z - N_{tot}) I / E_s A_s = \\ = (M_3 / z - N_{tot}) \psi_s / E_s A_s. \end{aligned} \quad (10.47)$$

Підставляючи $\varepsilon_{b,c}$ і $\varepsilon_{s,c}$ у формулу (10.33), після перетворень отримаємо вираз для кривизни елемента

$$\frac{1}{r} = M_3 / h_0 z [\psi_s / E_s (A_s + A_{sp}) + \psi_b / A_{b,c} E_b \omega'] - N_{tot} \psi_s / h_0 E_s (A_s + A_{sp}). \quad (10.48)$$

Формулу (10.48) можна використовувати у разі короткочасного і довготривалого навантажень звичайних і попередньо-напружених елементів, які піддаються згину, позацентровому стиску і розтягу (при $e_{0,tot} > 0.8 h_0$).

За відсутності повздовжньої сиди, наприклад, при згині звичайного залізобетонного елемента, останній член правої частини формули (10.48) перетворюється в нуль.

Приведену площу стисненої зони бетону над тріщиною, яка входить у формулу (10.48), для прямокутного, таврового і двотаврового перерізів, можна виразити так (рис.10.9.) :

$$A_{b,c,red} = (b'_f - b) h'_f + v / \omega' (A'_s + A'_{sp}) + bx = (\varphi_f + \xi) bh_0 \quad (10.49)$$

де

$$\varphi_f = [(b'_f - b) h'_f + v / \omega' (A'_s + A'_{sp})] / bh_0, \quad (10.50)$$

$\xi = x / h_0$ – відносна висота стисненої зони бетону у перерізі з тріщиною.

Визначення висоти стисненої зони і значення z .

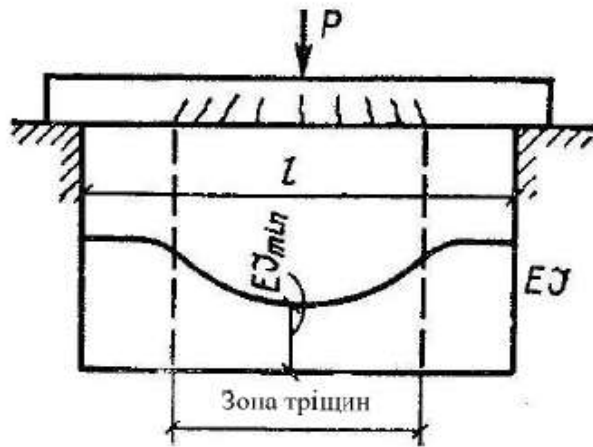


Рис. 10.13. Схема зміни жорсткості залізобетонної балки та її прольоту.



Рис. 10.14. До розрахунку прогинів попередньо напружених елементів.

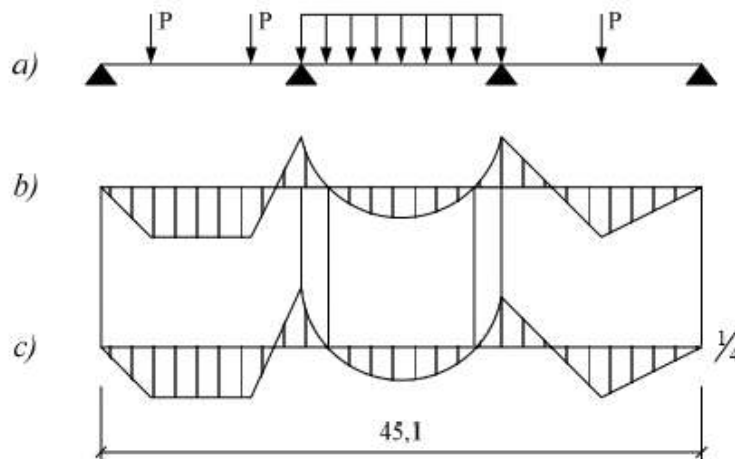


Рис. 10.15. Епюра згинальних моментів і кривизни у залізобетонному елементі постійного перерізу: *a* – схема розташування навантаження; *b* – епюра згинальних моментів; *c* – епюра кривизни.

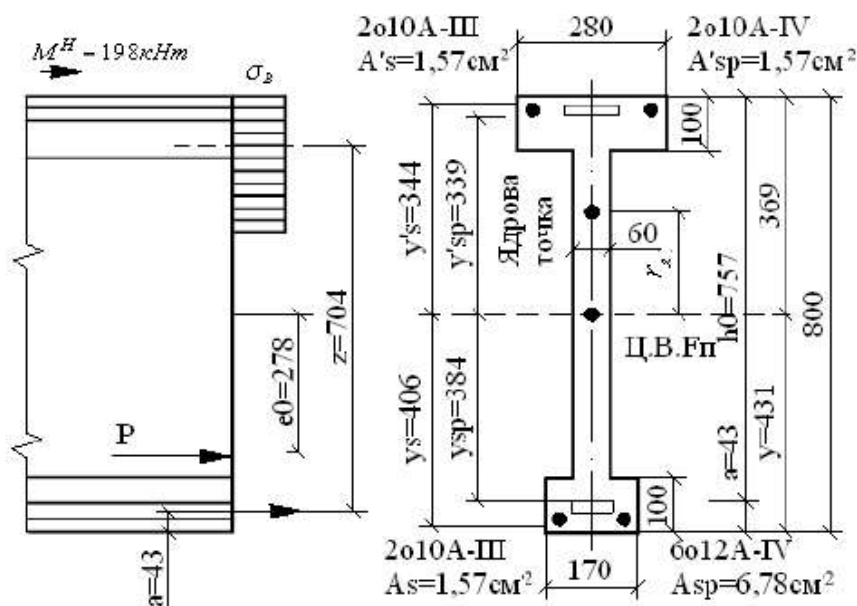


Рис. 10.16. До прикладу 8.2.

Відстань від центра ваги перерізу всієї арматури, розташованій у розтягненій зоні, до точки прикладання рівнодійної зусиль у стисненій зоні над тріщиною z визначаємо так.

При прямолінійній епюрі напружень зусилля у бетоні стисненої зони у перерізі з тріщиною (рис.10.10).

$$N_b = A_{b,c} \sigma_b = \sigma_b [(b'_f - b) h'_f + bx], \quad (10.51)$$

a – зусилля у стиснутій арматурі

$$N'_s = A'_s \sigma'_s = A'_s (V / \dot{\omega}) \sigma_b, \quad (10.52)$$

де

$$v = E_s / E_b.$$

Момент рівнодійної зусиль стисненої зони щодо центра ваги розтягнутої арматури

$$\sigma_b \{ [(b'_f - b) b'_f + bx] + A'_s (v / \dot{\omega}) \} z = \sigma_b [(b'_f - b) h'_f (h_0 - 0.5 h'_f)] + \sigma_b b x (h_0 - 0.5 x) + A'_s \sigma_b (v / \dot{\omega}') (h_0 - a'). \quad (10.53)$$

Приймаючи $a' \approx 0.5 h'_f$, $\xi = x / h_0$ і використовуючи (10.50), після перетворень одержимо

$$z = h_0 \{ [1 - [h'_f / h_0] \varphi_f + \xi^2] / 2 (\varphi_f + \xi) \}. \quad (10.54)$$

Отже, z визначається як відстань між центрами ваги перерізу розтягнутої арматури A_s і приведеною площею бетону стисненої зони $A_{b,c,red}$. При тому за формулою (10.49) $A_{b,c,red} = (\varphi_f + \xi) b h_0$. Для позацентрово-стиснених елементів значення приймається не більше $0.97 e_{0\,tot}$.

Відносна висота стисненої зони ξ визначають, враховуючи експериментальну залежність між деформацією крайнього волокна стисненої зони бетону і зусиллями, які діють у перерізі. Для прямокутних перерізів згинальних елементів на основі експериментів

$$\xi = 1 / \{ \beta + [1 + 5 (\delta + \lambda)] / 10 v M \} \pm (1.5 + \varphi_f / [11.5 (e_{0\,tot} / h_0) \pm 0.5]) \quad (10.55)$$

Але приймається не більше 1.

Для другого доданка правої частини формули (10.55) верхні знаки приймаються при стискальному, а нижні – при розтягувальному зусиллях N_{tot} .

У формулі (10.55): β – коефіцієнт, який приймаємо рівним для бетону: важкого і легкого – 1.8; дрібнозернистого – 1.6; пористого – 1.4;

$$\delta = M / b h_0^2 R_{b,ser}; \quad (10.56)$$

$$\lambda = \varphi_f (1 - h'_f / 2 h_0). \quad (10.57)$$

Коефіцієнт ψ_b і ω' . Коефіцієнт ψ_b , який входить у формулу (10.48) для визначення кривизни, враховує нерівномірність крайових деформацій бетону стисненої зони на ділянках між тріщинами. Як було показано раніше, за допомогою дослідів встановлено, що коефіцієнт ψ_b змінюється від 0.7...1. У нормах пропонують приймати ψ_b таким, що дорівнює: для важкого, дрібнозернистого бетону, легкого класів вище В 7.5-0.9; для легкого бетону класів В 7.5 і нижче та пористого бетону – 0.7; для конструкцій, розрахованих на дію багаторазового повторного навантаження, незалежно від виду і класу бетону – 1.

Коефіцієнт ω' являє собою відношення пружної частини деформації крайнього волокна бетону стисненої зони до повної його деформації, яка об'єднує пружні і непружні деформації (повзучість, усадку, пластичні деформації).

ції). Цей коефіцієнт значною мірою залежить від довготривалої дії навантаження.

У разі довготривалої дії навантаження розвивається деформації повзучості і усадки, і коефіцієнт ω' зменшується.

На основі експериментальних даних у нормах пропонують приймати ω' таким, що дорівнює: для всіх видів бетонів при недовготривалій дії навантаження – 0.45, а при довготривалій дії навантаження і вологості навколишнього середовища 40%; для важкого і легкого бетону – 0.15%, для пористого бетону – 0.07.

Коефіцієнт ψ_b . З появою тріщин у бетоні розтягненої зони згинальних елементів епюри напружень у арматурі і розтягнутого бетону мають вигляд, показаний на рис. 10.11.

Під час збільшення навантаження напруження у арматурі і її видовження будуть збільшуватися, і це спричинить порушення зчеплення арматури з бетоном і до зниження участі розтягнутого бетону у роботі елемента.

Отже, зі збільшенням навантаження зусилля, яке сприймається розтягненим бетоном, зменшуватиметься.

Коефіцієнт ψ_s являє собою відношення середнього напруження (деформації) у арматурі на ділянці між тріщинами до напруження (деформації) у перерізі з тріщиною

$$\psi_s = \varepsilon_{s,c} / \varepsilon_s = \sigma_{s,c} / \sigma_s. \quad (10.58)$$

Графічно цей коефіцієнт можна зобразити як відношення площі епюри напружень в арматурі на ділянці між тріщинами до всієї площі епюри напружень (рис.8.12):

$$\psi_s = (\sigma_s l_t - \omega'_p \sigma_{s2} l_t) / \sigma_s l_t = 1 - \omega'_p (\sigma_{s2} / \sigma_s), \quad (10.59)$$

де $\sigma_s = \sigma_s - \sigma_{s1}$ – різниця напружень у арматурі у перерізах з тріщиною і посередині ділянки між тріщинами; ω'_p – коефіцієнт повноти епюри розтягувальних напружень у бетоні на ділянці між тріщинами.

На значення ψ_s істотно впливають напруження у арматурі, відсоток армування, пружно-пластичні властивості бетону, профіль арматурних стрижнів, довготривала дія навантаження тощо.

Численні експерименти засвідчили, що у балках з арматурою періодичного профілю утворення тріщин і вилучення бетону розтягнутої зони із роботи відбувається менш інтенсивно, ніж у балках з гладкою арматурою.

У разі довготривалої дії навантаження спостерігається подальший розвиток тріщин і вилучення із роботи бетону розтягнутої зони, що зумовлює до збільшення ψ_s .

У нормах пропонують для елементів із важкого дрібнозернистого, легкого бетонів і двошарових попередньо напружених конструкцій із пористого і важкого бетонів визначити коефіцієнт ψ_s за емпіричною формулою

$$\psi_s = 1.25 - \varphi_1 \varphi_m - (1 - \varphi_m^2) / (3.5 - 1.8 l_m) e_{0\text{tot}} / h_0. \quad (10.60)$$

Значення ψ_s за своїм фізичним змістом не може бути більшим від одиниці. До того ж необхідно приймати $e_{0\text{tot}} / h_0 \geq 1.2 \varphi_1$.

Для згинальних елементів, виконаних без попереднього напруження ар-

матури, останній член у правій частині формули (10.60) допускається приймати таким, що дорівнює нулю.

У формулі (10.60) φ_1 – коефіцієнт, який враховує вплив на довготривалу дію навантаження і набуває значень недовготривалої дії навантаження – 1.1...0.7, а при довготривалому – 0.8–0.7; $e_{0\ tot}$ – визначається за формулою ($e_{0\ tot} = [M_3 / N_{tot}]$);

$$\varphi_m = R_{br\ ser} W_{pl} / |M_r \pm M_{rp}|. \quad (10.61)$$

Але не більше 1. Тут W_{pl} – момент інерції опору, перерізу; M_r, M_{rp} – згинальні моменти, які спричиняють розтяг у арматурі S .

Для одношарових конструкцій із пористого бетону (без попереднього напруження)

$$\psi_s = 0.5 + \varphi_1 (M / M_{ser}). \quad (10.62)$$

Тут M_{ser} – момент, що сприймається перерізом елемента із розрахунку за міцність у разі розрахункових опорах арматури і бетону для граничних станів другої групи; φ_1 – коефіцієнт, який приймають таким, що дорівнює при недовготривалій дії навантаження для арматури періодичного профілю – 0,6, для гладкої арматури – 0,7; при довготривалій дії навантаження незалежно від профілю арматури – 0,8. Для конструкцій, що розраховуються на втому, значення коефіцієнта $\psi_s = 1$.

Визначення кривизни і прогинів. Основні положення розрахунку за деформаціями було розглянуто стосовно випадку чистого згину. У разі перемінної епюи моментів жорсткість елемента за довжиною буде змінною, а мінімальне значення буде у найнапруженішому перерізі (рис. 10.13).

Дослідження показують, що як при короткочасній, так і у разі довготривалого навантаження підвищується жорсткість менш напружених частин балок і незначною мірою впливає на найбільші деформації (10-15%). Тому найбільші деформації згинальних елементів постійного перерізу можуть бути визначені за мінімальною жорсткістю, обчисленій за формулою (10.48) для найнапруженішого перерізу. Інакше кажучи, допускають, що кривизна елемента при згині змінюється пропорційно до згинального моменту.

Повна кривизна для ділянки з тріщинами у розтягненій зоні

$$(1/r) = (1/r)_1 - (1/r)_2 + (1/r)_3 - (1/r)_4, \quad (10.63)$$

де $(1/r)_1$ – кривизна від недовготривалої дії всього навантаження, на яке виконується розрахунок за деформаціями; $(1/r)_2$ – кривизна від недовготривалої дії постійних і довготривалих навантажень; $(1/r)_3$ – кривизна від довготривалої дії постійного і довготривалого навантаження; $(1/r)_4$ – кривизна, зумовлена вигинном елемента, внаслідок усадки і повзучості бетону від зусилля попереднього обтиску і визначається за формулою (10.31).

Кривизни $(1/r_1), (1/r_2), (1/r_3)$ визначають за формулою (10.48); при тому $(1/r_1)$ і $(1/r_2)$ – обчислюють за значень ψ_s і λ_b , які відповідають недовготривалій дії навантаження, а $(1/r_2)$ – при ψ_s і λ_b , що відповідають довготривалій дії навантаження. Якщо значення $(1/r_2)$ і $(1/r_3)$ виявляються від'ємними, тоді їх приймають такими, що дорівнюють нулю.

Під час визначення повної кривизни згинальних звичайних залізобетонних елементів за формулою (10.48) останній член у правій частині дорівнює нулю.

За знайденими значеннями кривизни прогин елемента від дії згинального моменту визначають за формулою (рис. 10.44).

$$f_m = \int M_x (1/r)_x dx, \quad (10.64)$$

де M_x – згинальний момент у перерізі x від дії одичної сили, прикладеної в напрямку переміщення, яке шукаємо у елементі у перерізі x за довжиною прольоту, для кожного визначається прогин; $(1/r_x)$ – повна кривизна елемента у перерізі x від навантаження, за якого визначається прогин; значення $(1/r)$ визначають за формулою (10.28) і (10.63) відповідно для ділянки без тріщин і з тріщинами; знак $(1/r)$ приймають у відповідно до епюри кривизни.

Для згинальних елементів постійного перерізу без попереднього напруження арматури, що мають тріщини, на кожній ділянці, у межах якого згинальний момент не змінює знака, кривизну допускається обчислювати для найнапруженішого перерізу, приймаючи кривизну для решти перерізів такої ділянки, що змінюється пропорційно до значень згинального моменту (рис. 10.15).

Обчислення інтервалу у формулі (10.64) можна замінити обчисленням за способом Верещагіна.

Прогини залізобетонного згинального елемента від дії зовнішніх сил можна також визначити за спрощеною формулою

$$f_m = S (1/r_{max}) l^2, \quad (10.65)$$

де $1/r_{max}$ – кривизна, яку обчислюють за формулою (10.48) для перерізу з найбільшим згинальним моментом; S – коефіцієнт, який залежить від схеми закріплення балки і особливості навантаження; його значення для найпоширеніших випадків наведені у табл. 10.4.

У разі завантаження елемента одночасно різними видами навантаження коефіцієнт

$$S = (S_1 M_1 + S_2 M_2 + \dots + S_n M_n) / (M_1 + M_2 + \dots + M_n), \quad (10.66)$$

де S_1 і M_1 ; S_2 і M_2 ; ...; S_n і M_n – коефіцієнти і найбільші згинальні моменти для кожного виду навантаження.

Для згинальних елементів при $l/h < 10$ необхідно враховувати вплив поперечних сил на їхній прогин. У такому разі повний прогин f_{tot} дорівнює сумі прогинів, зумовлених відповідно деформацією згину f_m і деформацією зсуву f_g .

Прогин, зумовлений деформацією зсуву,

$$f_g = \int Q_k \gamma_x dx, \quad (10.67)$$

де Q_k – поперечна сила у перерізі x від дії за напрямком шуканого переміщення одичної сили, прикладеної у перерізі, де визначається прогин; γ_x – деформація зсуву:

$$\gamma_x = (1,5 Q_x t_{b2} / Q_b h_0) \varphi_{crc}. \quad (10.68)$$

Тут Q_x – поперечна сила у перерізі x від дії зовнішнього навантаження; Q – модуль зсуву бетону; φ_{b2} – коефіцієнт, який враховує вплив довготривалої повзучості бетону; φ_{crc} – коефіцієнт, який враховує вплив тріщин на деформації зсуву і його приймають таким, що дорівнює: на ділянках за довжиною елемента, де

відсутні нормальні і похилі до повздовжньої осі елемента тріщини – 1; на ділянках, де є лише нахилени до повздовжньої осі елемента тріщини – 4,8; на ділянках, де є лише нормальні або нормальні і нахилени до повздовжньої осі елемента тріщини – за формулою

$$\varphi_{crc} = (3E_b I_{red} / M_x) \left(\frac{1}{r}\right)x, \quad (10.69)$$

де $M_x, \left(\frac{1}{r}\right)x$ – відповідно момент від зовнішнього навантаження і повна кривизна у перерізі x від навантаження, за якого визначають прогин.

Для суцільних плит завтовшки менше 25см, окрім спертих по контуру, армованих плоскими сітками, з тріщинами у розтягненій зоні значення прогинів, обчислюється за формулою (10.64), множать на коефіцієнт $[h_0 I (h_0 - 0.7)]^3$ і приймають не більше 1.5; ($h_0, см$).

Приклад 10.1. Визначити момент M_{crc} , за якого утворюються тріщини у попередньо-напруженій балці за даними прикладу 9.1 (див. рис.9.29).

Розв'язання 1. Визначаємо зусилля стиску P і ексцентриситет e_{op} за формулами (23.17) і (23.18), прийнявши значення попереднього напруження за винятком всіх втрат: $\sigma_{sp} = 357.35$ МПа и $\sigma_p = 463.01$ МПа. Напруження в ненапруженій арматурі $\sigma_s = \sigma'_s = 0$;

$$P = \sigma_{sp} A_{sp} + \sigma'_s A'_s - \sigma_s A_s - \sigma'_x A'_x - \sigma'_s A'_s = 357.35 \cdot 100 \cdot 11.4 + 463.01 \cdot 100 \cdot 2.36 - 0 - 0 = 516649 \text{ Н};$$

$$e_{op} = (\sigma_{sp} A_{sp} y_{sp} - \sigma'_s A'_s y'_{s0}) / P = (357.35 \cdot 100 \cdot 11.4 \cdot 36.4 - 463.01 \cdot 100 \cdot 2.36 \cdot 35.85) / 516649 = 21.1 \text{ см}.$$

2. Знаходимо відстань від центра ваги приведенного перерізу верхньої ядрової точки (при $A_{red} = 904.9 \text{ см}^2$; $I_{red} = 775292.8 \text{ см}^4$; $y = 41.9 \text{ см}$: див. приклад 23.1 за формулою 23.16).

$$r_{я.в} = I_{red} / A_{red} y = 77522.8 / 904.9 \cdot 41.9 = 20.45 \text{ см}.$$

3. Знаходимо момент зусилля P відносно ядрової точки за формулою (10.10)

$$M_p = P(e_{op} + r) = 516649(21.1 + 20.45) = 21466765 \text{ Нсм} = 214667.7 \text{ Нм}$$

4. Визначаємо момент M_{crc} , під час якого утворюються тріщини, за формулою

$$M_{oc} = R_{bt} W_{pl} + M_p = 1.8 \cdot 100(775292.8 / 41.9)(1/10^6) + 214667.7 = 214671 \text{ Нм}.$$

Приклад 10.2: Знайти прогин у середині прольоту попередньо напруженої балки двутаврового перерізу (рис. 10.16) з розрахунковим прольотом $l = 8.5$ м при короткочасній дії рівномірно розподіленого нормативного навантаження $q'' = 22000$ Н/м. Напружена арматура з горячекатанної сталі класу А-IV; бетон класу В30.

Балка під час нормативного експлуатаційного навантаження працює з тріщинами у розтягненій зоні.

Розв'язання 1. Визначаємо рівнодійну зусиль стиску P і її ексцентриситет e_{op} щодо центра ваги приведенного розрізу за формулами (23.17) і (23.18),

приймаючи значення попереднього напруження за винятком всіх втрат $\sigma_{sp} = \sigma'_{sp} = 250$ МПа; напруження в ненапруженій арматурі дорівнюють втратам від усадки та повзучості $\sigma_s = \sigma'_s = 84$ МПа:

$$P = \sigma_{sp}(A_{sp} + A'_s) - \sigma_s(A_s + A'_s) = 250 \cdot 100[6,78 + 1,57] - 84 \cdot 100[1,57 + 1,57] = 183100 \text{ Н};$$

$$e_{0p} = \left[\sigma_{sp} A_{sp} y_{sp} + \sigma'_s A'_s y'_s - \sigma_{sp} A'_s y_{sp} - \sigma_s A_s y_s \right] / P = \\ = (250 \cdot 100 \cdot 6,78 \cdot 38,84 + 84 \cdot 100 \cdot 1,57 \cdot 344,4 - 250 \cdot 100 \cdot 1,57 \cdot 33,9 - \\ - 84 \cdot 100 \cdot 1,57 \cdot 40,6) / 183100 = 27,8 \text{ см}$$

2. Вираховуємо нормативний момент $M^* = \frac{22000 \cdot [8,5]^2}{8} = 198000 \text{ Нм}$,

3. Відстань від центра ваги розрізу поздовжньої арматури, розтягнутої від зовнішніх чинників, до нижньої грані перерізу

$$a = (A_{sp} a_{sp} + A_s a_s) / (A_{sp} + A_s) = (6,78 \cdot 4,7 + 1,57 \cdot 2,5) / (6,78 + 1,57) = 4,3 \text{ см}$$

4. Заміняючий момент формулою (10.43)

$$M_3 = M + P e_{0p} = 198000 + 183000(0,431 - 0,278 - 0,043) = 218100 \text{ Нм}$$

5. Для визначення площі стиснутої зони приведенного розрізу над тріщиною при дії моменту M_3 вираховуємо ω ; δ , λ , μ , $e_{s,tot}$, ξ : за формулою (10.50) при $\omega = 0,45$ і

$$v = E_s / E_b = 190000 / 29000 = 6,55 / 1 \\ \varphi_f = [(b'_f - b) h'_f + (v/\omega)(A'_{sp} + A'_s)] / b h_0 = \\ = [(28 - 6) 10 + (6,55/0,45)(1,57 + 1,57)] / 6 \cdot 75,7 = 0,585;$$

за формулою (10.56)

$$\delta = \frac{M_3}{b h_0^2 R_b} = \frac{218100 \cdot 100}{6 \cdot 75,7^2 \cdot 22 \cdot 100} = 0,29;$$

за формулою $\lambda = \varphi_f (1 - h'_f / 2 h_0) = 0,585 (1 - 10 / 2 \cdot 75,7) = 0,544$;

коефіцієнт армування $\mu = (A_{sp} + A_s) / b h_0 = (6,78 + 1,57) / 6 \cdot 75,7 = 0,0184$;

ексцентриситет поздовжньої сили $e_{s,tot} = M_3 / N_{tot} = 218100 - 100 / 183100 = 124,5 \text{ см}$; за формулою (10.55)

$$\xi = 1 / \left[\beta + \frac{1 + 5(\delta + \lambda)}{10 \mu v} \right] \pm (1,5 + v / f) / \left[11,5 \left(\frac{e_s}{h_0} \right) \pm 5 \right] = \\ 1 / \left[1,8 + \frac{1 + 5(0,29 + 0,544)}{100,0184 \cdot 6,55} \right] + (1,5 + 0,585) / \left(11,5 \frac{124,5}{75,7} - 5 \right) = 0,314;$$

за формулою (10.49) $A_{b,c,red} = (\varphi_f + \xi) b h_0 = (0,585 + 0,314) 6 \cdot 75,7 = 544,6 \text{ см}^2$.

6. За формулою (10.54)

$$z = h_0 \left[1 - \frac{h_1 / 1 + \xi^2}{2(v / 1 + \xi)} \right] = 75,7 \left[1 - \frac{10}{75,7} \frac{0,585 + 0,314^2}{2(0,585 + 0,314)} \right] = 70,4 \text{ см}$$

7. Щоб визначити за формулою (10.60) коефіцієнт φ , необхідно вирахувати коефіцієнт φ_m .

$$\varphi_m = \frac{R_b W_{pl}}{M_r + M_{sp}} = \frac{1,8 \cdot 100 \cdot 77528,8 / 41,9 \cdot 1 / 10^6}{218100} = 0,000015.$$

$\varphi_s = 0,9$ (див. пояснення до формули (2.60)).

8. За формулою (10.60) коефіцієнт

$$\psi = 1,25 - \varphi_m - \frac{4 - \varphi_m^2}{(3,5 - 1,8 \varphi_m) e_s / h_0} = 1,25 - 0,9 \cdot 0,000015 - \frac{1 - 0,000015}{(3,5 - 1,8 \cdot 0,000015) 124,5 / 75,7} = 1,08$$

приймаємо $\varphi = 1$

9. За формулою (10.48) кривизна, яку приймають $\varphi = 0,9$ (див. пояснення до формули (10.39)), дорівнює:

$$\frac{1}{r} = \frac{M_3}{h_0 z} \left[\frac{\psi_s}{E_s (A_s + A_{sp})} + \frac{\psi_b}{E_s (A_{b,c} + A_b)} \right] - \frac{N \psi_s}{h_0 E_s (A_s + A_{sp})} =$$

$$\frac{218100 \cdot 100}{75,7 \cdot 70,4} \left[\frac{1,0}{190000(6,78 + 1,75)100} + \frac{0,9}{576,6 \cdot 29000 \cdot 0,45 \cdot 100} \right] - \frac{183100 \cdot 1,0}{75,7 \cdot 190000(6,78 + 1,57) \cdot 100} = 1,58 \cdot 10^{-5} \text{ см}$$

10. Прогин балки в середині прольоту за формулою (10.65)

$$f_M = s(1/r_{\max})l^2 = (5/48)1,58 \cdot 10^{-5} \cdot 850^2 = 1,19 \text{ см};$$

$$f_M/L = 1,19/850 = 1/714 \approx 1/250.$$

Питання для самоперевірки

1. Як впливають тріщини на жорсткість і довговічність залізобетонних елементів?
2. На які зусилля виконують розрахунок залізобетонних елементів на утворення тріщин?
3. На утворення яких тріщин виконують розрахунок залізобетонних елементів?
4. Яке граничне розкриття тріщин у залізобетонних елементах?
5. Які конструкції розраховують на закриття тріщин?
6. З якою метою вимагається розрахунок елементів за деформаціями?
7. Як визначаються деформації елементів?
8. У чому полягає складність розрахунку залізобетонних елементів з тріщинами у розтягненій зоні?
9. Який фізичний зміст коефіцієнта φ_b і φ_s ?