

Національний університет водного господарства та
Природокористування

Кафедра промислового, цивільного будівництва
та інженерних споруд

03-01-152М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних занять з курсу
**«Проектування будівельних конструкцій захисних споруд
цивільного захисту»**
для здобувачів вищої освіти другого
(магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою
«Промислове і цивільне будівництво» спеціальності
192 «Будівництво та цивільна інженерія»
всіх форм навчання

Рекомендовано науково-методичною
радою з якості ННІБА
Протокол № 1 від 29 серпня 2023 р.

Рівне – 2023

Методичні вказівки до виконання практичних занять з курсу «Проектування будівельних конструкцій захисних споруд цивільного захисту» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Промислове і цивільне будівництво» спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія». [Електронне видання] / Бабич Є. М., Філіпчук С. В. – Рівне : НУВГП, 2023. – 33 с.

Укладачі: Бабич Є. М. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд; Філіпчук С. В., кандидат технічних наук, доцент кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд.

Відповідальний за випуск: Бабич Є. М., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд.

Керівник групи забезпечення спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Масюк Г. Х.

© Є. М. Бабич,
С. В. Філіпчук, 2023
© НУВГП, 2023

Зміст

Вступ	4
1. Загальна характеристика вогнепальної зброї	5
2. Визначення виду і класу бетону	6
3. Визначення необхідної товщини захисних конструкцій	9
4. Розрахунок несучої здатності залізобетонних плит за деформаційною методикою з використанням дволінійної діаграми деформування бетону	15
5. Розрахунок кривизни елементів при руйнуванні	20
6. Спрощена методика розрахунку захисних споруд	22
7. Приклади розрахунку захисних споруд	22
Література	33

Вступ

В загальному для вирішення задачі проектування захисного покриття відбувається у такий послідовності:

1. Забезпечення міцності захисного покриття на пробій;
2. Забезпечення міцності захисного покриття на згин;
3. Забезпечення міцності захисного покриття на

поперечну силу;

4. Підбір складу бетону під відповідний коефіцієнт проникнення.

При проектуванні захисних споруд необхідно вирішувати чотири типи задач:

1. Перевірка міцності існуючих захисних конструкцій на ймовірну вогневу дію. При вирішенні даної задачі відомі параметри обстрілювання, клас та вид бетону, а також відоме армування. В окремих випадках параметри вид та тип обсіпки захисної споруди.

2. Запроектувати конструкцію захисної споруди при відомих параметрах обстрілювання. Це доволі широка, оптимізаційна задача, яка може мати багатоваріантне вирішення. При її рішенні отримують: необхідну товщину, параметри армування, тип та вид бетону.

При вирішенні цього типу задач повинні бути наперед відомі параметри матеріалу, які визначаються конструктивними та технологічними особливостями відповідних заводів та підприємств будівельної індустрії. За відомих параметрів зброї необхідно із умов пробиття встановити потрібну товщину фортифікаційної конструкції, після чого уточняється значення товщини із умов міцності.

3. Визначити необхідне армування захисної конструкції при відомих параметрах обстрілювання та заданих конструктивних параметрах, як захисної споруди, так і бетону.

Даний тип задач необхідно вирішувати у випадку відомих параметрів зброї та конструкції захисної споруди. Задача зводиться до пошуку умов армування, виду та класу бетону при заданих інших параметрах. У даному випадку попередньо визначають необхідний коефіцієнт піддатливості проникненню матеріалу, за яким попередньо встановлюють необхідні міцнісні

параметри матеріалу. Після їх встановлення перевіряється загальна міцність конструкції. За необхідності можуть збільшуватися міцнісні параметри шляхом використання вищих класів бетону, армування тощо. Рішенням таких задач необхідно пристосовувати конструкції захисних споруд, що проектуються, під задані види зброї.

4. При відомому армуванні та заданих конструктивних параметрах захисної споруди встановити необхідний клас та вид бетону. При застосуванні спеціальних видів бетону, наприклад сталевібробетону, армування може бути взагалі відсутнім.

1. Загальна характеристика вогнепальної зброї

Розрахунок захисних споруд повинен виконуватись з урахуванням параметрів вогнепальної зброї, до основних з яких належать наступні:

- швидкість підходу боєприпасу до захисної товщі v_c , м/с;
- маса боєприпасу m , кг;
- калібр снаряду d , мм;
- висота головної частини снаряду H_2 , м. (рис. 1).

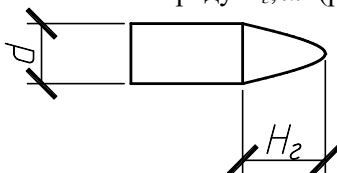


Рис. 1. Геометричні характеристики снаряду

Швидкість підходу боєприпасу до захисної товщі v_c повинна визначатися за балістичними розрахунками. Допускається приймати дану швидкість рівною початковій швидкості боєприпасу.

Основні параметри вогнепальної зброї (швидкість підходу боєприпасу до захисної товщі, маса боєприпасу, калібр снаряду, висота головної частини снаряду) встановлюються за паспортними даними. При відсутності певних даних допускається використовувати характеристики зброї з близькими параметрами.

2. Визначення виду і класу бетону

Для призначення виду і класу бетону та умов армування повинні бути задані вихідні дані, які включають:

- геометричні параметри розрахункової стіни або перекриття фортифікаційної споруди: розрахунковий проліт l_0 , м; висота (ширина) H , м; товщина h , м;

- параметри вогневої зброї, вогнепальний вплив, якої повинно витримувати захисне покриття: швидкість підходу боеприпасу до захисної товщі v_c , м/с; маса боеприпасу m , кг; калібр снаряду d , мм; висота головної частини снаряду H_c , м.

Допоміжні параметри визначаються за наступними формулами:

- коефіцієнт форми головної частини снаряду λ_1

$$\lambda_1 = 0,5 + 0,4\sqrt[3]{\left(\frac{H_c}{d}\right)^2}; \quad (1)$$

- коефіцієнт калібру снаряду λ_2 встановлюємо за формулою

$$\lambda_2 = 2,8\sqrt[3]{d} - 1,3\sqrt{d}; \quad (2)$$

- коефіцієнт, який враховує форму головної частини снаряду та його калібр

$$\lambda = \lambda_1\lambda_2. \quad (3)$$

Коефіцієнти піддатливості проникненню матеріалу з умови, що пробивання відбувається під прямим кутом до поверхні захисної конструкції, за виразом

$$k_{np} = \frac{hd^2}{\lambda m v_c}. \quad (4)$$

Характеристичні значення призмової міцності бетону призначаються за формулами:

- для важкого бетону (в межах від С15 до С100)

$$f_{fck,prism} = \frac{13,37 - k_{np} \times 10^7}{0,05}; \quad (5)$$

- для дрібнозернистого бетону (в межах від С15 до С80)

$$f_{fck,prism} = \frac{13,75 - k_{np} \times 10^7}{0,05}; \quad (6)$$

- для дрібнозернистого сталевібробетону (в межах від С15 до С80)

$$f_{fck,prism} = \frac{11,55 - k_{np} \times 10^7}{0,05}. \quad (7)$$

За визначеною призмовою міцністю бетону приймається вид і клас бетону та за табл. 3.1 [1] визначаються його основні характеристики: $f_{ck,prism}, f_{cd}, f_{ct}, E_c, \varepsilon_{c1}, \varepsilon_{cu1}$

Значення коефіцієнту піддатливості проникненню для встановленого типу та класу бетону знаходяться за наступними формулами:

- для важкого бетону (від С15 до С100)

$$k_{np} = (13,37 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}; \quad (8)$$

- для дрібнозернистого бетону (від С15 до С80)

$$k_{np} = (13,75 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}; \quad (9)$$

- для дрібнозернистого сталевібробетону (від С15 до С80)

$$k_{np} = (11,55 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}. \quad (10)$$

Глибина проникнення боєприпасу в захисне покриття визначається за формулою

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c. \quad (11)$$

Час дії навантаження знаходиться за формулою

$$\tau = \frac{2h_{np}}{v_c}. \quad (12)$$

Граничні деформації стиску відповідного класу та типу бетону ε_{cu} попередньо приймаються рівними $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1}$.

Швидкість зміни деформацій приймається рівною

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau}. \quad (13)$$

Значення ε_{cu1} в розрахунках необхідно використовувати з урахуванням зміцнення бетону при впливах динамічного характеру. Для цього необхідно знайти коефіцієнт динамічного зміцнення бетону за формулою

$$\left\{ \begin{array}{l} DEF_c = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} \quad \text{при } 30 \times 10^{-6} \leq \dot{\varepsilon} \leq (30 + 23i) c^{-1}; \\ DEF_c = \eta \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^k \quad \text{при } (30 + 23i) \leq \dot{\varepsilon} \leq 300 c^{-1}, \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\text{де } \alpha_s = \frac{1}{5 + 9f_c / f_{c0}}, \quad f_{c0} = 10 \text{ МПа}; \quad \dot{\varepsilon}_{sc} = 30 \times 10^{-6} c^{-1},$$

$$\gamma_s = 10^{(6,15\alpha_s - 2)}, \quad \eta = (1 - 0,3392i)\gamma_s, \quad k = \frac{1 + 0,05i}{3},$$

$$i = \begin{cases} 0 - \text{для важкого бетону}; \\ 1 - \text{для сталевіфібробетону}. \end{cases}$$

У виразах (14): $\dot{\varepsilon}$ – швидкість зростання деформацій, c^{-1} ; f_c – міцність бетону на стиск при статичній дії навантаження, МПа.

Уточнення значення граничних деформацій стиску відповідного класу та типу бетону здійснюється за формулою

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c}. \quad (15)$$

Розбіжність між попередньо прийнятими значеннями граничних деформацій стиску $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1}$ та $\varepsilon_{cu1,d}$, що отримані за виразом (15) не повинна перевищувати 5%. Якщо різниця більше 5%, необхідно визначити нове значення коефіцієнту динамічного зміцнення, прийнявши $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1,d}$.

Інші динамічні характеристики бетону вибраного типу та класу знаходяться за формулами:

- коефіцієнт динамічного зміцнення при розтязі

$$DEF = DEF_c^{2/3}; \quad (16)$$

- розрахунковий опір стиску при встановленому динамічному впливі

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c; \quad (17)$$

- розрахунковий опір розтягу при встановленому динамічному впливі

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct}; \quad (18)$$

- модуль деформацій при встановленому динамічному впливі

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2; \quad (19)$$

- деформаційні характеристики

$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c}; \quad (20)$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF}; (\varepsilon_{ct1} = 667 \times 10^{-5} - \text{для фібробетонів}); \quad (21)$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF}; (\varepsilon_{ctu} = 1000 \times 10^{-5} - \text{для фібробетонів}). \quad (22)$$

Гранична кривизна $\frac{1}{r_{ult}}$ та максимальний згинаючий

момент, який може сприйняти конструкція M_{ult} , визначаються за формулами, наведеними в пункті 4.

За наявності визначених всіх параметрів умова міцності конструкції перевіряється за виразом

$$mv_c^2 \leq \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} \quad (23)$$

Виконання умови (23) свідчить про те, що вид і клас бетону для конструкції визначено правильно. При невиконанні умови (23) необхідно збільшити клас або тип бетону та повторити розрахунок. В окремих випадках можна змінити конструкцію фортифікаційної споруди або влаштувати обвалування.

3. Визначення необхідної товщини захисних конструкцій

Для визначення необхідної товщини захисних конструкцій необхідні такі дані:

- геометричні параметри розрахункової стіни або перекриття фортифікаційної споруди: розрахунковий проліт l_0 , м, висота (ширина) H , м,;

- параметри вогневої зброї, вогнепальний вплив, якої повинно витримувати захисне покриття: швидкість підходу боеприпасу до захисної товщі v_c , м/с; маса боеприпасу m , кг; калібр снаряду d , мм; висота головної частини снаряду H_c , м;

- клас та тип бетону, із заданими фізико-механічними характеристиками;

- схема та параметри армування, що планується.

Встановлюється вплив армування на міцність бетону. Вплив армування на міцність бетону необхідно враховувати при наявності наступних конструктивних умов:

1) площі перерізу стержнів на одиницю довжини в одному та в іншому напрямках не відрізняються більш ніж у 1,5 рази;

2) відстань між стержнями одного напрямку не перевищують 150 мм, і не перевищують більше, ніж 1/3 меншої сторони перерізу елемента.

Якщо конструктивні умови армування відповідають приведена міцність бетону з урахуванням армування визначається за формулою

$$f_{c,red} = f_{fck,prism} + \varphi \mu_{xy} f_{s,xy}, \quad (24)$$

де $f_{s,xy}$ – розрахунковий опір арматури,

φ – коефіцієнт ефективності армування, що визначається за виразом

$$\varphi = \frac{1}{0,23 + \psi}, \quad (25)$$

$$\psi = \frac{\mu_{xy} f_{s,xy}}{f_c + 10}, \quad (f_c, f_{s,xy} - \text{в МПа}), \quad (26)$$

$$\mu_{xy} = \frac{n_x A_{sx} l_x + n_y A_{sy} l_y}{A_{ef} s}. \quad (27)$$

Для дрібнозернистого бетону коефіцієнт φ приймається не більше одиниці.

У виразах (24) і (27):

n_x, A_{sx}, l_x – відповідно число стержнів, площа поперечного перерізу і довжина стержня в одному напрямку;

n_y, A_{sy}, l_y – те саме, в іншому напрямку;

A_{ef} – площа перерізу бетону, що знаходиться в середині контуру сіток, (рис. 2);

s – відстань між стержнями в напрямку дії динамічного навантаження (рис. 2).

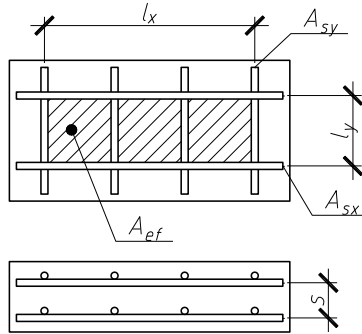


Рис. 2 До визначення приведеної міцності бетону

Якщо умови армування не відповідає конструктивним умовам, попередньо встановлюється значення коефіцієнту піддатливості проникненню для встановленого типу та класу бетону за формулами:

- для важкого бетону (від С15 до С100)

$$k_{np} = (13,37 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}; \quad (28)$$

- для дрібнозернистого бетону (від С15 до С80)

$$k_{np} = (13,75 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}; \quad (29)$$

- для дрібнозернистого сталевібробетону (від С15 до С80)

$$k_{np} = (11,55 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7}. \quad (30)$$

У випадку залізобетонної плити із армуванням, що відповідає конструктивним вимогам, у виразах (28) - (30) необхідно замість $f_{fck,prism}$ приймати $f_{c,red}$.

Глибина проникнення боеприпасу в захисне покриття встановлюється за формулою

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c. \quad (31)$$

Товщина захисної конструкції приймається не менше глибини проникнення боеприпасу $h \geq h_{np}$.

Час дії навантаження знаходиться за формулою

$$\tau = \frac{2h}{v_c}. \quad (32)$$

Граничні деформації стиску відповідного класу та типу бетону попередньо призначаються за 3.1 [1] $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1}$.

Швидкість зміни деформацій визначається за формулою

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau}. \quad (33)$$

Коефіцієнт динамічного зміцнення бетону знаходиться за формулою

$$\left\{ \begin{array}{l} DEF_c = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} \quad \text{при } 30 \times 10^{-6} \leq \dot{\varepsilon} \leq (30 + 23i) c^{-1}; \\ DEF_c = \eta \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^k \quad \text{при } (30 + 23i) \leq \dot{\varepsilon} \leq 300 c^{-1}, \end{array} \right. \quad (34)$$

$$\text{де } \alpha_s = \frac{1}{5 + 9f_c / f_{c0}}, \quad f_{c0} = 10 \text{ МПа}; \quad \varepsilon_{sc} = 30 \times 10^{-6} c^{-1},$$

$$\gamma_s = 10^{(6,15\alpha_s - 2)}, \quad \eta = (1 - 0,3392i)\gamma_s, \quad k = \frac{1 + 0,05i}{3},$$

$$i = \begin{cases} 0 - \text{для важкого бетону}; \\ 1 - \text{для сталевібробетону}. \end{cases}$$

Значення граничних деформацій стиску відповідного класу та типу бетону обчислюється за формулою

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c}. \quad (35)$$

Обчислюється різниця між попередньо прийнятими значеннями граничних деформацій стиску $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1}$ та $\varepsilon_{cu1,d}$, яка не повинна перевищувати 5%. Якщо різниця більше 5%, визначаємо нове значення коефіцієнту динамічного зміцнення, прийнявши $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1,d}$.

Динамічні характеристики бетону вибраного класу та типу знаходяться за формулами:

- коефіцієнт динамічного зміцнення при розтязі

$$DEF = DEF_c^{2/3}; \quad (36)$$

- розрахунковий опір стиску при встановленому динамічному впливі

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c; \quad (37)$$

- розрахунковий опір розтягу при встановленому динамічному впливі

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct}; \quad (38)$$

- модуль деформацій при встановленому динамічному впливі

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2; \quad (39)$$

- деформаційні характеристики

$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c}; \quad (40)$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF}; (\varepsilon_{ct1} = 667 \times 10^{-5} - \text{для фібробетонів}); \quad (41)$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF}; (\varepsilon_{ctu} = 1000 \times 10^{-5} - \text{для фібробетонів}). \quad (42)$$

Коефіцієнти динамічного зміцнення арматури необхідно визначати за графіком, наведеним на рис. 3. Значення межі текучості арматури у залежності від її класу при динамічних впливах необхідно знаходити за рис. 1.4 або за системою

$$f_{y,d} = DEF_s \times f_y = \begin{cases} A - 240, \left(1 + 2,227 \times \dot{\varepsilon}\right) f_y \leq 1,48; \\ A - 400, \left(1 + 1,272 \times \dot{\varepsilon}\right) f_y \leq 1,27; \\ A - 500, \left(1 + 0,75 \times \dot{\varepsilon}\right) f_y \leq 1,15. \end{cases} \quad (43)$$

Визначення граничної кривизну $\frac{1}{r_{ult}}$ та згинаючого моменту M_{ult} здійснюється відповідно до п. 4.

За отриманих параметрах перевіряється умова

$$mv_c^2 \leq \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{1}{r_{ult}} l. \quad (44)$$

Якщо умова (44) виконується, то вважається, що вид і клас бетону, армування і товщина конструкції встановлені вірно. За невиконання умови (44) необхідно збільшити товщину захисного покриття та повторити розрахунок.

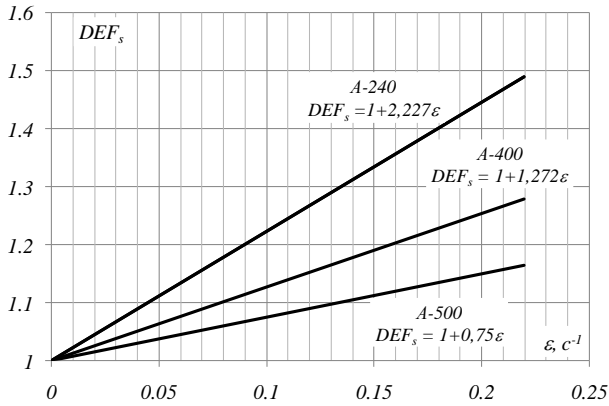


Рис. 3. Зміна коефіцієнта зміцнення арматурної сталі у залежності від швидкості зміни деформацій

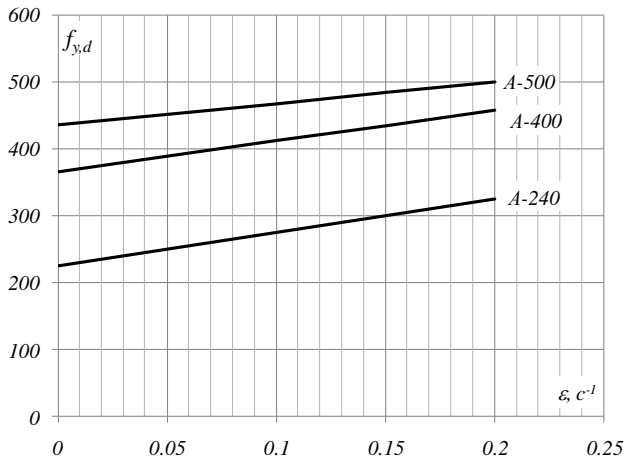


Рис. 4 Залежність межі текучості при динамічних впливах $f_{y,d}$ у залежності від швидкості зміни деформацій $\dot{\varepsilon}$

4. Розрахунок несучої здатності залізобетонних плит за деформаційною методикою з використанням дволінійної діаграми деформування бетону

А Залізобетонні конструкції.

Відповідно до ДСТУ Б В.2.6-156:2010 розрахунок несучої здатності залізобетонних конструкцій необхідно виконувати за нелінійною деформаційною методикою, сутність якої полягає у тому, що враховується приріст не зусиль, а деформацій у перерізі. Водночас допускається використовувати спрощені діаграми залежності напруження-деформації бетону, в якості яких можна приймати дволінійну залежність.

За використанні спрощеної діаграми деформування бетону допускається приймати рівномірний розподіл напружень в стиснутому бетоні, замінюючи криволінійну епюру напружень на прямокутну шляхом введенням коефіцієнтів λ , η (рис. 5).

Значення коефіцієнтів λ , η , які визначають фактичну висоту та міцність, стиснутої зони бетону визначаються за виразами

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 \text{ при } f_{ck} \leq 50 \text{ МПа}; \\ 0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400} \text{ при } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ МПа}; \end{cases} \quad (45)$$

$$\eta = \begin{cases} 1,0 \text{ при } f_{ck} \leq 50 \text{ МПа}; \\ 1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \text{ при } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ МПа}. \end{cases} \quad (46)$$

Для дрібнозернистого бетону $\lambda=0,7$.

Значення несучої здатності згинальних залізобетонних елементів прямокутного перерізу з одиничним армуванням при $\xi = x/d \leq \xi_R$ визначається за формулою

$$M_{ult} = \lambda \eta f_c b x (d - 0,5 \lambda x), \quad (47)$$

де x – висота стиснутої зони залізобетонного елемента визначається за формулою

$$x = \frac{1}{\lambda \eta} \frac{f_{yd} A_s}{f_c b}. \quad (48)$$

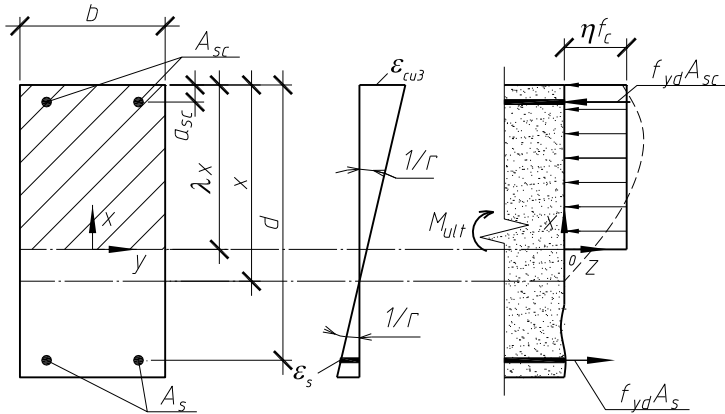


Рис. 5 Схема зусиль та епюри напружень у нормальному перерізі при використанні дволінійної діаграми деформування бетону

Для елементів із подвійним армуванням:

а) при $\xi = x/d \leq \xi_R$

$$M_{ult} = \lambda \eta^f_c b x (d - 0,5 \lambda x) + f_{yd} A_{sc} (d - a_{sc}), \quad (49)$$

$$x = \frac{1}{\lambda \eta} \frac{f_{yd} A_s - f_{yd} A_{sc}}{f_c b}. \quad (50)$$

б) при $\xi = x/d > \xi_R$

$$M_{ult} = \lambda \eta^f_c b x_R (d - 0,5 \lambda x_R) + f_{yd} A_{sc} (d - a_{sc}). \quad (51)$$

Граничне значення висоти стиснутої зони визначається за виразом

$$\xi_R = \frac{x_R}{d} = \frac{\varepsilon_{cu,3}}{\varepsilon_{cu,3} + \varepsilon_{s0}}, \quad (52)$$

де $\varepsilon_{s0} = \frac{f_{yd}}{E_s}$ – розрахункове значення граничних відносних

деформацій арматури;

$\varepsilon_{cu,3}$ – граничні значення стиснутого бетону при використанні спрощеної діаграми деформування.

Допускається несучу здатність згинальних елементів визначати з використанням модифікованих розрахункових опорів залізобетону. В цьому випадку несучу здатність визначають за формулою

$$M_{ult} = W_c f_{zM} \cdot \quad (53)$$

де $W_c = \frac{bd^2}{6}$ – момент опору робочого перерізу бетону

елемента, що розраховується;

f_{zM} – розрахунковий опір залізобетону на згин, який залежить від класів бетону і арматури, форми перерізу та процента армування перерізу визначається за виразом

$$f_{zM} = k_z f_c \cdot \quad (54)$$

Параметр k_z обчислюється залежно від механічного коефіцієнта армування ω , за таблицями.

Б. Фібробетонні конструкції без армування поздовжньої арматури.

В розрахунках фібробетонних згинальних елементів допускається використання спрощеної моделі роботи фібробетону, яка приймається із припущень прямокутного розподілу напружень у стиснутій та розтягнутій зонах бетону (рис. 6).

Значення несучої здатності згинальних фібробетонних елементів прямокутного перерізу без поздовжнього армування визначається за виразом

$$M_{ult} = 0,5 \eta f_{fc} b x_p h, \quad (55)$$

де x_p – висота стиснутої зони за спрощеної прямокутної епюри напружень бетону фібробетонного елемента без поздовжнього армування визначається за формулою

$$x_p = \frac{\eta_t k f_{fc} h}{\eta_t k f_{fc} h + \eta f_{fc}} \cdot \quad (56)$$

де $k = 0,56$;

η_t – коефіцієнт повноти епюри напружень у розтягнутій зоні в перерізі фібробетонного елемента, приймається у залежності від відношення опору фібробетону на розтяг при згині, до остаточної міцності фібробетону на розтяг при згині.

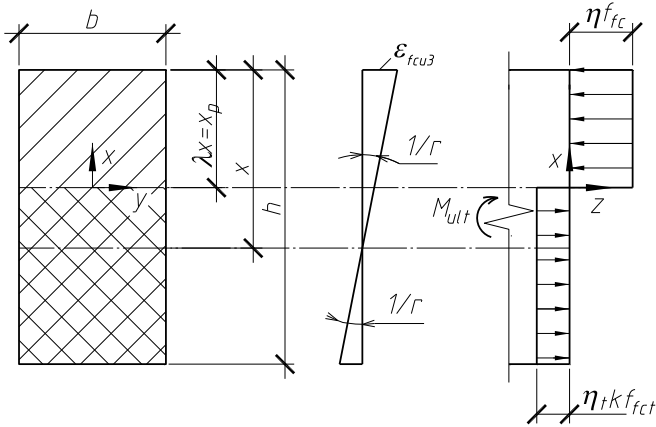


Рис. 6 Схема зусиль та епюри напружень у перерізі, нормальному до поздовжньої осі згинального фібробетонного елемента прямокутного перерізу без поздовжнього армування при розрахунку його за міцністю

$$\eta_t = \begin{cases} 0,75 \text{ при } 0,5 \leq \frac{f_{fct3}}{f_{fct}} < 0,7; \\ 0,85 \text{ при } 0,7 \leq \frac{f_{fct3}}{f_{fct}} < 0,9; \\ 0,95 \text{ при } 0,9 \leq \frac{f_{fct3}}{f_{fct}} < 1,1; \\ 1,05 \text{ при } 1,1 \leq \frac{f_{fct3}}{f_{fct}} < 1,3; \\ 1,15 \text{ при } 1,3 \leq \frac{f_{fct3}}{f_{fct}}. \end{cases} \quad (57)$$

Нелінійна деформаційна модель з використанням функції Єврокоду-2 для стиснутої та розтягнутої зони бетону може бути реалізована з використанням ЕОМ.

В. Фібробетонні конструкції з армуванням поздовжньою арматурою.

Значення несучої здатності згинальних фібробетонних елементів прямокутного перерізу з поздовжнім армуванням при $\xi = x_p / d \leq \xi_R$ визначається за виразом (рис. 7)

$$M_{ult} = \eta f_{fc} b x_p (d - 0,5 \lambda x_p) + \eta_t k f_{fc} b (h - x_p) \left(\frac{h - x}{2} - a \right) + f_{yd} A_{sc} (d - a_{sc}). \quad (58)$$

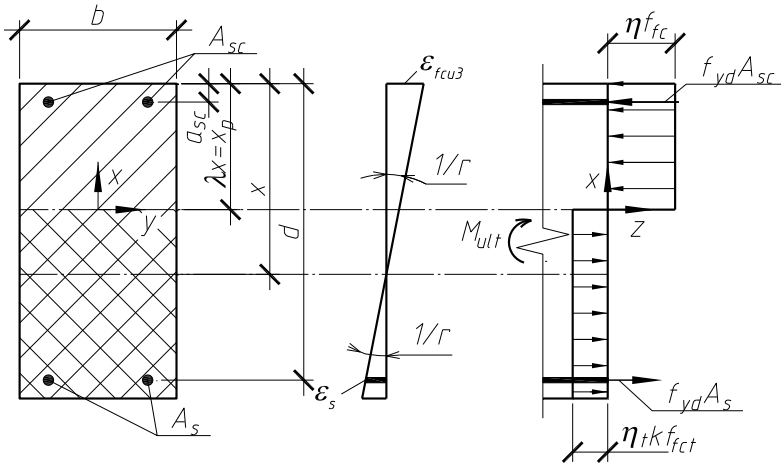


Рис. 7. Схема зусиль та епюри напружень у перерізі, нормальному до поздовжньої осі згинального фібробетонного елемента прямокутного перерізу з поздовжнім армуванням при розрахунку його за міцністю

$$M_{ult} = \eta f_{fc} b x_p (d - 0,5 \lambda x_p) + \eta_t k f_{fc} b (h - x_p) \left(\frac{h - x}{2} - a \right) + f_{yd} A_{sc} (d - a_{sc}). \quad (59)$$

де $a = h - d$, x_p – висота стиснутої зони за спрощеної прямокутної епюри напружень бетону фібробетонного елемента з поздовжнім армуванням визначається за формулою

$$x_p = \frac{f_{yd} A_s - f_{yd} A_{sc} + \eta_t k f_{fc} b h}{(\eta_t k f_{fc} h + \eta f_{fc} b)}. \quad (60)$$

Граничне значення висоти стиснутої зони визначаємо за умови

$$\xi_R = \frac{\varpi \varepsilon_{fcu,3}}{\varepsilon_{fcu,3} + \varepsilon_{s0}}, \quad (61)$$

де $\varepsilon_{s0} = \frac{f_{yd}}{E_s}$ – розрахункове значення граничних

відносних деформацій арматури;

$\varepsilon_{fcu,3}$ – граничні значення стиснутого фібробетону бетону при використанні спрощеної діаграми деформування;

ϖ – характеристика стиснутої зони фібробетону, яка приймається для фібробетону з важкого бетону класу до C60 включно рівною 0,8, а для фібробетону з важкого бетону класів C70 – C100 та з дрібнозернистого бетону – рівною 0,7.

Нелінійна деформаційна модель з використанням функції Єврокод-2 для стиснутої та розтягнутої зони бетону, а також діаграми Прандля для арматури, реалізується з використанням ЕОМ.

5. Розрахунок кривизни елементів при руйнуванні

А Залізобетонні конструкції.

Кривизну елемента перед руйнуванням можна визначити за деформаційною методикою, використовуючи залежність "напруження-деформації" в бетоні у вигляді, запропонованому у Єврокод-2. Приймаючи плече внутрішньої пари сил $z=0,78d$, формулу для визначення кривизни можна прийняти у вигляді

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{f_{yd}}{0,45E_s d}. \quad (62)$$

Також для визначення кривизни можна використати інші наближені формули залежно від прийнятої форми епюри напружень в стиснутій зоні бетону:

- при трикутній формі епюри напружень

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\alpha \rho_f d \left(\sqrt{1 + \frac{2}{\alpha \rho_f}} - 1 \right)}, \quad (63)$$

де $\rho_f = A_s / (bd)$ – коефіцієнт армування; $\alpha = E_s / E_{ck}$.

- при рівномірному розподілу напружень у стиснутій зоні бетону

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu3}}{\lambda x}, \quad (64)$$

де x – висота стиснутої зони залізобетонного елемента.

Б Фібробетонні конструкції без поздовжнього армування.

Доцільно використати спрощений метод, допускаючи прямокутний характер розподілу напружень у стиснутій та розтягнутій зонах фібробетону. Для цього за виразом (56) встановлюється висота стиснутої зони в момент руйнування, яка повинна визначатися при значеннях розрахункових опорів бетону, які відповідають граничним станам другої групи. За цих умов граничне значення кривизни елемента можна визначити за виразом

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{fcu,3}}{\lambda x_p}, \quad (65)$$

де λ – коефіцієнт, який визначає фактичну висоту стиснутої зони фібробетону (приймається для фібробетону з важкого бетону класу до С60 включно рівною 0,8, а для фібробетону з важкого бетону класів С70 – С100 та з дрібнозернистого бетону – рівною 0,7).

В Фібробетонні конструкції з армуванням поздовжньою арматурою.

Розрахунок граничного значення кривизни виконується за виразом (65), як для фібробетонних елементів без поздовжнього армування. У такому разі висоту стиснутої зони фібробетонних елементів за спрощеної прямокутної епюри напружень x_p , визначають за виразом (63), у якому також приймають значення розрахункових опорів фібробетону, що відповідають граничним станам другої групи.

6. Спрощена методика розрахунку захисних споруд

Допускається виконувати розрахунки міцності захисного покриття за формулами:

$$h \geq h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c; \quad (66)$$

$$v_c \leq \frac{4M_{ult}}{l} \frac{\lambda k_{np}}{d^2}. \quad (67)$$

Формула (66) виражає умову міцності на пробивання, друга умова (67) дозволяє встановлювати максимально можливу швидкість боєприпасу, при якій ще буде забезпечена загальна міцність захисної плити. Друга умова отримана шляхом знехтування внутрішньої енергії, що припадає на прогин захисної стіни. Це дає можливість застосовувати запропоновані умови для розрахунку стін при різних граничних умовах.

Порядок розрахунку за спрощеною методикою наступний:

1. Встановлюється глибина проникнення боєприпасу у захисну стіну за виразом (66).
2. Перевіряється умова (66). За необхідності збільшується товщина захисної стіни.
3. Встановлюється динамічні характеристики бетону та арматури.
4. Визначається несуча здатність M_{ult} при отриманих динамічних характеристиках.
5. Перевіряється умова (67).

7. Приклади розрахунку захисних споруд

Приклад 1. За конструктивними особливостями захисна плита має розрахунковий проліт $l_0=3$ м, висоту $H=3$ м, товщину $h=20$ см. Захисне покриття повинно витримувати пряме попадання від патрону кулемету ДШК, який має такі тактико-технічні характеристики: калібр 12,7 мм, вагу $m=48,2$ г, початкова швидкість $v_c=840$ м/с, висота головної частини патрону $H_r=33,43$ мм.

Необхідно:

А) Підібрати клас дрібнозернистого фібробетону.

Б) Підібрати клас важкого бетону, за умови, що виробничі потужності заводу обмежені класом бетону С30. За необхідності планується армування арматурою класу А500, з межею текучості $f_y=435$ МПа.

Розв'язок.

1. Попередньо визначаємо необхідний коефіцієнт піддатливості проникненню. Для цього попередньо визначимо допоміжні параметри, а також приймемо, що пуля проникає під прямим кутом до захисного покриття

$$\lambda_1 = 0,5 + 0,4\sqrt[3]{\left(\frac{H_z}{d}\right)^2} = 0,5 + 0,4\sqrt[3]{\left(\frac{33,43}{12,7}\right)^2} = 1,263;$$

$$\lambda_2 = 2,8\sqrt[3]{d} - 1,3\sqrt{d} = 2,8\sqrt[3]{0,0127} - 1,3\sqrt{0,0127} = 0,507;$$

$$\lambda = \lambda_1\lambda_2 = 1,263 \times 0,507 = 0,640;$$

$$k_{np} = \frac{h_{np} d^2}{\lambda m v_c} = \frac{0,15 \times 0,0127^2}{0,640 \times 0,0482 \times 840} = 9,34 \times 10^{-7}.$$

2. Визначаємо необхідну міцність дрібнозернистого сталевібробетону $f_{fck,prism}$

$$f_{fck,prism} = \frac{11,55 - k_{np} \times 10^7}{0,05} = \frac{11,55 - 9,34 \times 10^{-7} \times 10^7}{0,05} = 44,2 \text{ МПа}.$$

3. За табл. встановлюємо, що дрібнозернистий фібробетон класу С70 має призову міцність на стиск $f_{fck,prism} = 50$ МПа. При цьому міцність на пробій буде забезпечена навіть без поздовжнього армування.

4. Встановлюємо значення коефіцієнту піддатливості проникненню за виразом

$$k_{np} = (11,55 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7} = (11,55 - 0,05 \times 50) \times 10^{-7} = 9,05 \times 10^{-7}.$$

5. Встановлюємо глибину проникнення пулі у захисне покриття за формулою

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c = 0,640 \times 9,05 \times 10^{-7} \frac{0,0482}{0,0127^2} 840 = 0,145 \text{ м};$$

6. Визначимо динамічні характеристики. Час дії навантаження визначимо за виразом

$$\tau = \frac{2h_{np}}{v_c} = \frac{2 \times 0,145}{840} = 3,45 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1};$$

7. Граничні деформації бетону попередньо прийємо $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cul} = 300 \times 10^{-5};$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau} = \frac{30 \times 10^{-4}}{3,45 \times 10^{-4}} = 8,7 \text{ c}^{-1};$$

8. Так як $\dot{\varepsilon} = 8,7 \text{ c}^{-1}$, то коефіцієнт динамічного зміцнення, визначимо за другим виразом системи

$$DEF_c = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} = \left(\frac{8,7}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1,026 \times 0,02} = 1,29.$$

$$\text{де } \alpha_s = \frac{1}{5 + 9 f_{fk, prism} / f_{c0}} = \frac{1}{5 + 9 \times 50,0 / 10} = 0,02.$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c} = \frac{300 \times 10^{-5}}{1,29} = 232,6 \times 10^{-5}.$$

Визначимо похибку

$$\Delta = \frac{300 - 232,6}{232,6} 100\% = 28,98\%.$$

Прийємо значення $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1,d} = 232,6 \times 10^{-5}$, та встановимо нові динамічні параметри

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{23,26 \times 10^{-4}}{3,45 \times 10^{-4}} = 6,74 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left(\frac{6,74}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0205} = 1,29.$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cul}}{DEF_c} = \frac{300 \times 10^{-5}}{1,29} = 232,6 \times 10^{-5}.$$

$$\Delta = \frac{232,6 - 232,6}{232,6} 100\% = 0\%.$$

Подальше уточнення виконувати не потрібно.

Визначимо динамічні характеристики дрібнозернистого фібробетону:

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 1,29^{2/3} = 1,185;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 1,29 \times 37 = 47,73 \text{ МПа.}$$

Прийmemo значення розрахункового опору на розтяг згідно табл. А.1 для С70 $f_{ct} = 3,8 \text{ МПа}$;

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,185 \times 3,8 = 4,5 \text{ МПа};$$

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2 = 41000 \times 1,29^2 = 68228 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c} = \frac{260 \times 10^{-5}}{1,29} = 202 \times 10^{-5}.$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF} = \frac{667 \times 10^{-5}}{1,185} = 563 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF} = \frac{1000 \times 10^{-5}}{1,185} = 844 \times 10^{-5};$$

9. Обчислюємо кривизну при граничному значенні згинального моменту

$$\frac{1}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{140,77 \times 10^{-5}}{0,0258} = 0,0546 \text{ м}^{-1}.$$

11. Перевіримо умову міцності

$$mv^2 = 0,0482 \times 840^2 = 34010 \text{ Дж} = 34,01 \text{ кНм};$$

$$\frac{1}{3} M_{ult} \frac{1}{r_{ult}} \quad l = \frac{1}{3} 239,94 \times 0,0546 \times 3 = 13,1 \text{ кНм};$$

$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 239,94}{3} \times 0,145 = 46,39 \text{ кНм}.$$

У даному випадку вплив внутрішньої потенційної енергії додаткового прогину складає 22%, завдяки великій довжині прольоту та незначній товщині плити. У багатьох фортифікаційних спорудах призначених для захисту від більш потужної зброї ця енергія буде знаходитись у межах 10-15 %.

Так як

$$mv^2 = 34,01 \text{ кНм} < \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{1}{r_{ult}} = 46,39 + 13,1 = 59,49 \text{ кНм},$$

міцність плити забезпечена.

Таким чином, для забезпечення захисної надійності блок посту при дії на нього зброї заданих параметрів, необхідно використати дрібнозернистий фібробетон класу С70.

Конструктивний розрахунок для важкого бетону класу С30

1. Як видно з попередніх розрахунків, для забезпечення міцності плити на пробій без армування можливо при використанні фібробетону класу не нижче С70. Визначимо необхідне армування для важкого бетону класу С30, так як виробничі потужності заводу обмежені саме ним.

Прийнемо армування у три ряди із зміщенням $\varnothing 16$ А500 ($A_{s1}=2,27 \text{ см}^2$) з кроком 150 мм.

2. Визначимо приведену міцність важкого бетону. Розрахунок виконаємо на 1 м/п (див. рис. 1).

$$\mu_{xy} = \frac{n_x A_{sx} l_x + n_y A_{sy} l_y}{A_{ef} s} = \frac{20 \times 2,27 \times 300 + 20 \times 2,27 \times 300}{300 \times 300 \times 8} = 0,039;$$

$$\psi = \frac{\mu_{xy} f_{s,xy}}{f_{ck,prism} + 10} = \frac{0,039 \times 435}{22,0 + 10} = 0,53;$$

$$\varphi = \frac{1}{0,23 + \psi} = \frac{1}{0,23 + 0,53} = 1,316;$$

$$f_{c,red} = f_{ck,prism} + \varphi \mu_{xy} f_{s,xy} = 22,0 + 1,316 \times 0,039 \times 435 = 44,32 \text{ МПа};$$

3. Встановлюємо значення коефіцієнту піддатливості проникненню

$$k_{np} = (13,37 - 0,05 f_{ck,prism}) \times 10^{-7} = (13,37 - 0,05 \times 44,32) \times 10^{-7} = 11,154 \times 10^{-7}.$$

4. Встановлюємо глибину проникнення пулі у захисне покриття

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c = 0,640 \times 11,154 \times 10^{-7} \frac{0,0482}{0,0127^2} 840 = 0,179 \text{ м};$$

5. Визначимо динамічні характеристики. Прийнемо лінійну залежність зміни швидкості від глибини проникнення, тоді час дії навантаження буде визначатися за виразом

$$\tau = \frac{2h_{np}}{v_c} = \frac{2 \times 0,179}{840} = 4,26 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1};$$

6. Граничні деформації бетону попередньо прийнемо $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1} = 350 \times 10^{-5};$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau} = \frac{35 \times 10^{-4}}{4,26 \times 10^{-4}} = 8,22 \text{ с}^{-1};$$

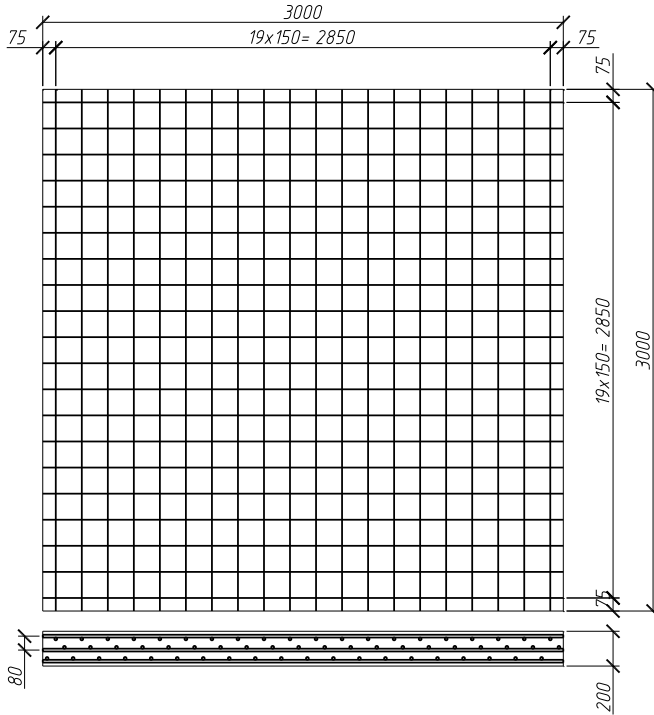


Рис. 1. До визначення коефіцієнта проникнення армованого важкого бетону до прикладу 1

7. Так як $\dot{\varepsilon} = 8,22 \text{ c}^{-1}$, то коефіцієнт динамічного зміцнення, визначимо за другим виразом системи

$$DEF_c = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} = \left(\frac{8,22}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1,026 \times 0,04} = 1,68.$$

$$\text{де } \alpha_s = \frac{1}{5 + 9 f_{fck,prism} / f_{c0}} = \frac{1}{5 + 9 \times 22,0 / 10} = 0,040.$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{350 \times 10^{-5}}{1,68} = 208,3 \times 10^{-5}.$$

Визначимо похибку

$$\Delta = \frac{350 - 208,3}{208,3} 100\% = 68\%.$$

Прийmemo значення $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1,d} = 208,3 \times 10^{-5}$, та встановимо нові динамічні параметри

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{20,83 \times 10^{-4}}{4,26 \times 10^{-4}} = 4,89 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left(\frac{4,89}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0414} = 1,64.$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{350 \times 10^{-5}}{1,64} = 213,4 \times 10^{-5}.$$

$$\text{Похибка } \Delta = \frac{213,4 - 208,83}{213,4} 100\% = 2,14\%.$$

Подальше уточнення виконувати не потрібно.

Визначимо динамічні характеристики сталевібробетону:

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 1,64^{2/3} = 1,39;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 1,64 \times 17 = 27,88 \text{ МПа}.$$

Прийmemo значення розрахункового опору на розтяг згідно табл. 3.1 [1] для С30 $f_{ct} = 1,15 \text{ МПа}$;

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,39 \times 1,15 = 1,60 \text{ МПа};$$

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2 = 32500 \times 1,64^2 = 87412 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c} = \frac{210 \times 10^{-5}}{1,64} = 128 \times 10^{-5}.$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF} = \frac{9,6 \times 10^{-5}}{1,39} = 6,91 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF} = \frac{13,87 \times 10^{-5}}{1,39} = 9,99 \times 10^{-5};$$

8. Визначимо коефіцієнт зміцнення арматурної сталі для А500

$DEF_s = 1 + 0,75 \dot{\varepsilon} = 1 + 0,75 \times 4,89 = 4,67 \leq 1,15$ (за графіком).

Остаточно приймаємо $DEF_s = 1,15$.

9. Динамічний опір арматури

$$f_{y,d} = f_y \times DEF_s = 435 \times 1,15 = 500,25 \text{ МПа}.$$

10. Обчислюємо кривизну при граничному значенні згинального моменту

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{178 \times 10^{-5}}{0,0328} = 0,0542 \text{ м}^{-1}.$$

11. Перевіримо умову міцності

$$mv^2 = 0,0482 \times 840^2 = 34010 \text{ Дж} = 34,01 \text{ кНм};$$

$$\frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = \frac{1}{3} 358,65 \times 0,0542 \times 3 = 19,44 \text{ кНм};$$

$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 358,65}{3} \times 0,179 = 85,6 \text{ кНм}.$$

У даному випадку вплив внутрішньої потенційної енергії додаткового прогину складає 22,7%, також завдяки великій довжині прольоту та незначній товщині плити.

Так як

$$mv^2 = 34,01 \text{ кНм} < \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = 34,01 + 85,6 = 119,61 \text{ кНм},$$

міцність плити забезпечена.

Таким чином, для забезпечення захисної надійності блок посту при дії на нього зброї заданих параметрів, необхідно використати важкий бетон класу С30, з такими характеристиками:

$$f_{fck,prism} = 22 \text{ МПа}, f_{fc} = 17 \text{ МПа}, f_{ct} = 1,2 \text{ МПа}.$$

Провівши розрахунки плит на заданий тип зброї отримали такі результати:

- блок пост можна виготовити із фібробетону класу С70 без поздовжнього армування, або з важкого бетону С30 з поздовжнім армуванням у три ряди із зміщенням $\varnothing 16$ А500 ($A_{s1}=2,27 \text{ см}^2$) з кроком 150 мм

- глибина проникнення у захисну плиту при фібробетоні С70 складає 145 мм, при важкому бетоні С30 із визначеним поздовжнім армуванням у три ряди із зміщенням $\varnothing 16$ А500 ($A_{s1}=2,27 \text{ см}^2$) з кроком 150 мм складає 179 мм, при цьому міцність на згин для фібробетону складає 59,49 кНм, для важкого бетону С30 з армуванням 119,61 кНм.

Приклад 2. За конструктивними особливостями захисна плита має розрахунковий проліт $l_0=2,0 \text{ м}$, висота $H=2,0 \text{ м}$. За

захисними властивостями блокпост повинен витримувати пряме попадання від снаряду БМП-2 (ОФЗ), який має такі тактико-технічні характеристики: калібр 30 мм, вагу $m=390$ г, початкова швидкість $v_c=960$ м/с, висота головної частини патрону $H_r=45,4$ мм.

Необхідно:

Визначити товщину неармованого захисного покриття блокпосту з дрібнозернистого фібробетону класу на стиск С80.

Розв'язок.

1. Встановлюємо, що дрібнозернистий фібробетон класу С80 має призмову міцність на стиск $f_{fck,prism} = 57$ МПа.

2. Визначаємо необхідний коефіцієнт піддатливості проникненню, за формулою (Помилка! Джерело посилання не знайдено.).

$$k_{np} = (11,55 - 0,05 f_{fck,prism}) \times 10^{-7} = (11,55 - 0,05 \times 57) \times 10^{-7} = 8,7 \times 10^{-7};$$

3. Знаходимо допоміжні параметри

$$\lambda_1 = 0,5 + 0,4 \sqrt[3]{\left(\frac{H_c}{d}\right)^2} = 0,5 + 0,4 \sqrt[3]{\left(\frac{45,4}{30}\right)^2} = 1,027;$$

$$\lambda_2 = 2,8 \sqrt[3]{d} - 1,3 \sqrt{d} = 2,8 \sqrt[3]{0,030} - 1,3 \sqrt{0,030} = 0,645;$$

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 = 1,027 \times 0,645 = 0,662;$$

4. Визначаємо необхідно товщину захисного покриття з умови проникнення снаряду на всю її глибину

$$h_{np} = \lambda k_{np} \frac{m}{d^2} v_c = 0,662 \times 8,7 \times 10^{-7} \frac{0,390}{0,030^2} 960 = 0,240 \text{ м};$$

5. Встановлюємо час дії навантаження

$$\tau = \frac{2h_{np}}{v_c} = \frac{2 \times 0,240}{960} = 5,0 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1};$$

6. Граничні деформації бетону попередньо прийемо $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1} = 280 \times 10^{-5};$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{cu}}{\tau} = \frac{28 \times 10^{-4}}{5,0 \times 10^{-4}} = 5,6 \text{ с}^{-1};$$

7. Так як $\dot{\varepsilon} = 5,6 \text{ c}^{-1}$, то коефіцієнт динамічного зміцнення, визначимо за другим виразом системи

$$DEF_c = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} = \left(\frac{5,6}{30 \times 10^{-6}} \right)^{1,026 \times 0,0178} = 1,25.$$

$$\text{де } \alpha_s = \frac{1}{5 + 9 f_{fck, prism} / f_{c0}} = \frac{1}{5 + 9 \times 57 / 10} = 0,0178;$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{280 \times 10^{-5}}{1,25} = 224 \times 10^{-5}.$$

Визначимо похибку

$$\Delta = \frac{280 - 224}{224} 100\% = 25\%.$$

Прийmemo значення $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu1,d} = 224 \times 10^{-5}$, та встановимо нові динамічні параметри

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\tau} = \frac{22,4 \times 10^{-4}}{5,0 \times 10^{-4}} = 4,48 \text{ c}^{-1}; DEF_c = \left(\frac{4,48}{30 \times 10^{-6}} \right)^{0,0183} = 1,24.$$

$$\varepsilon_{cu1,d} = \frac{\varepsilon_{cu1}}{DEF_c} = \frac{280 \times 10^{-5}}{1,24} = 226 \times 10^{-5}.$$

$$\Delta = \frac{226 - 224}{224} 100\% = 0,89\%.$$

Подальше уточнення виконувати не потрібно.

Визначимо динамічні характеристики фібробетону:

$$DEF = DEF_c^{2/3} = 1,24^{2/3} = 1,15;$$

$$f_{c,d} = DEF_c \times f_c = 1,24 \times 41 = 50,84 \text{ МПа}.$$

Прийmemo значення розрахункового опору на розтяг для С80 $f_{ct} = 4,2 \text{ МПа}$;

$$f_{ct,d} = DEF \times f_{ct} = 1,15 \times 4,2 = 4,83 \text{ МПа};$$

$$E_{c,d} = E_c DEF_c^2 = 42000 \times 1,24^2 = 52080 \text{ МПа};$$

$$\varepsilon_{c1,d} = \frac{\varepsilon_{c1}}{DEF_c} = \frac{270 \times 10^{-5}}{1,24} = 218 \times 10^{-5}.$$

$$\varepsilon_{ct1,d} = \frac{\varepsilon_{ct1}}{DEF} = \frac{667 \times 10^{-5}}{1,15} = 580 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{\varepsilon_{ctu}}{DEF} = \frac{1000 \times 10^{-5}}{1,15} = 870 \times 10^{-5};$$

8. Розрахуємо граничну кривину та згинаючий момент на основі нелінійної деформаційної моделі.

$$\frac{l}{r_{ult}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{155,2 \times 10^{-5}}{0,0329} = 0,047 \text{ м}^{-1}.$$

$$M_{ult} = 245,42 \text{ кНм}.$$

9. Перевіримо умову міцності

$$mv^2 = 0,390 \times 960^2 = 359424 \text{ Дж} = 359,4 \text{ кНм};$$

$$\frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = \frac{1}{3} 245,42 \times 0,0542 \times 2 = 8,87 \text{ кНм};$$

$$\frac{4M_{ult}}{l} h_{np} = \frac{4 \times 245,42}{2} \times 0,240 = 117,8 \text{ кНм}.$$

Так як

$$mv^2 = 359,4 \text{ кНм} > \frac{4M_{ult}}{l} h_{np} + \frac{1}{3} M_{ult} \frac{l}{r_{ult}} = 8,87 + 117,8 = 126,7 \text{ кНм},$$

міцність плити незабезпечена.

10. Із умови пропорційності знайдемо наближене значення товщини плити

$$h_{np2} = \sqrt{\frac{mv^2}{\frac{4M_{ult}}{l} h_{np}}} = \sqrt{\frac{359,4}{117,8} \times 0,240^2} = 0,42 \text{ м}.$$

Література

1. ДБН В.2.6–98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. К. : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.
2. Рекомендації з проектування залізобетонних конструкцій фортифікаційних споруд: рекомендації / Бабич Є. М., Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Кочкарьов Д. В., Філіпчук С. В., Бордюженко О. М. Рівне : НУВГП, 2018. 173 с.
3. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони : монографія / Дворкін Л. Й., Бабич Є. М., Житковський В. В., Бордюженко О. М., Філіпчук С. В., Кочкарьов Д. В. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.
4. Баженов Ю. М. Бетон при динамическом нагружении. М. : Стройиздат. 1970, 274 с.
5. EN 1992-1.1: Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings.