

УДК 624.012

РОБОТА ВАЖКОГО БЕТОНУ ПРИ ДІЇ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В КОНСТРУКЦІЯХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

WORK OF HEAVY CONCRETE UNDER THE ACTION OF DYNAMIC LOADS IN BUILDINGS AND STRUCTURES

Філіпчук С.В., к.т.н, доцент ORCID 0000-0002-4464-4620, Караван В.В., к.т.н, доцент ORCID 0000 -0002-8261-692X, Голуб О.В., к.т.н, доцент, Бабіч Є.Є., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування м. Рівне)

Filipchuk S., candidate of technical sciences, associate professor ORCID 0000-0002-4464-4620; Karavan V., candidate of technical sciences, associate professor ORCID 0000-0002-8261-692X; Holub O., candidate of technical sciences, associate professor, Babich Ye.Ye., candidate of technical sciences, associate-professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

В статті теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені залежності для встановлення міцнісних та деформаційних характеристик важких бетонів при динамічних впливах, що дозволяє визначати характеристики бетонів при різних видах напружено-деформованого стану.

Concrete is one of the main building materials in the world, from which a large number of buildings and engineering structures are built. Heavy concrete is mainly used in constructions of buildings and structures that are subject to static and dynamic loads. Dynamic load is caused by the operation of machines and equipment with unbalanced masses, vehicles, explosions and impacts, wind gusts, sea waves, seismic and other influences. In building structures under the influence of dynamic loads there are vibrations, movements and deformations, forces and stresses. An analysis of the results of scientific research on dynamic loads, their characteristics and their impact on the structures of buildings and bridge structures is presented. Theoretically and experimentally confirmed dependences for determination of strength and deformation characteristics of high-strength concretes under dynamic influences are proposed. That allows to determine the characteristics of high-strength concrete under different types of stress-strain state. The possibility of determining the deformation characteristics of concretes depending on the compressive strength and the coefficient of dynamic strengthening is proved, which allows to simplify engineering calculations for dynamic loads. The newly derived expressions for determination of dynamic strengthening coefficient and ultimate deformations under dynamic actions are theoretically

substantiated and obtained. The proposed expressions reveal wide possibilities for generalization and analysis of experimental data under the action of dynamic influences. Experimental verification of the obtained expressions, which showed sufficient accuracy for engineering calculations. The possibility of obtaining reliable data on a simple coprop equipment in the laboratory is substantiated.

Ключові слова: бетон, міцність, деформація, напруження, навантаження, конструкція, динаміка, коливання, удар, коефіцієнт, руйнування.
concrete, strength, deformation, stress, load, construction, dynamics, oscillation, impact, coefficient, destruction.

Вступ. Бетон є одним з основних будівельних матеріалів у світі з якого зводять велику кількість будівель та інженерних споруд. Бетони різних видів та класів за міцністю використовують практично у всіх галузях господарства. Переважно в конструкціях будівель і споруд, що зазнають впливу статичних та динамічних навантажень, застосовують саме важкий бетон. Використання залізобетону у конструкціях будівель і споруд обумовлено його довговічністю, надійністю, високим опором до впливу статичних і динамічних навантажень.

Стан питання та задачі дослідження. Динамічними називають навантаження, значення яких, напрям або місце прикладання швидко змінюються з часом. До динамічних належать ударні, раптово прикладені і повторно-змінні навантаження. Ударні навантаження виникають, наприклад, під час кування металу або забивання паль; прикладом раптово прикладеного навантаження є тиск колеса, яке котиться по рейці; повторно-змінних навантажень зазнають, наприклад, деталі кривошипно-повзунного механізму двигуна. Треба пам'ятати, що до зовнішніх сил, які беруть до уваги при розрахунках конструкцій, належать не тільки активні сили, а й реакції опор і сили інерції.

До динамічних відносяться навантаження, які змінюють величину та розташування в короткий проміжок часу. З усього різноманіття динамічних навантажень, які діють на споруди, можна назвати такі основні види [1]:

1. Нерухоме навантаження, що діє постійно або періодично змінює свою величину та частоту. Наприклад, токарні та ткацькі верстати, друкарські машини, різні двигуни, вентилятори, компресори, пилорами, вібраційні машини та інше стаціонарне обладнання (рис. 1.1, а).

2. Рухоме навантаження, що змінює своє положення на конструкції. Передається від мостових кранів, рейкового або автомобільного транспорту тощо (рис. 1.1б).

3. Імпульсне навантаження, що діє на конструкцію протягом досить малого проміжку часу в результаті вибуху, раптової зміни тиску газу або рідини в трубопроводах або резервуарах, при включенні, вимкненні або короткому замиканні електромашин і т. д. (рис. 1.1, в).

4. Ударне навантаження, що створюється падаючими тілами, копрами, молотами та іншими механізмами ударної дії (рис. 1.1, г), звуковими ударними хвилями при польотах надзвукових літаків, при вибухах.

5. Динамічна складова вітрового навантаження, викликана пульсацією швидкісного напору, враховується при розрахунку висотних споруд з періодом власних коливань більше 0,25 с, наприклад багатопверхових будівель висотою більше 40 м, одноповерхових однопрольотних виробничих будівель висотою більше 36 м, відкритих щогл, веж, димових труб, опор ліній електропередач та інших споруд (рис. 1.1, д).

6. Сейсмічна навантаження, що виявляється у вигляді безладних зсувів і коливань ґрунту, поштовхів та ударів при землетрусі (рис. 1.1, е).

7. Комбіноване навантаження, що складається з декількох видів динамічних впливів, наприклад, від групових динамічних впливів великої кількості машин із синхронним або асинхронним приводом.

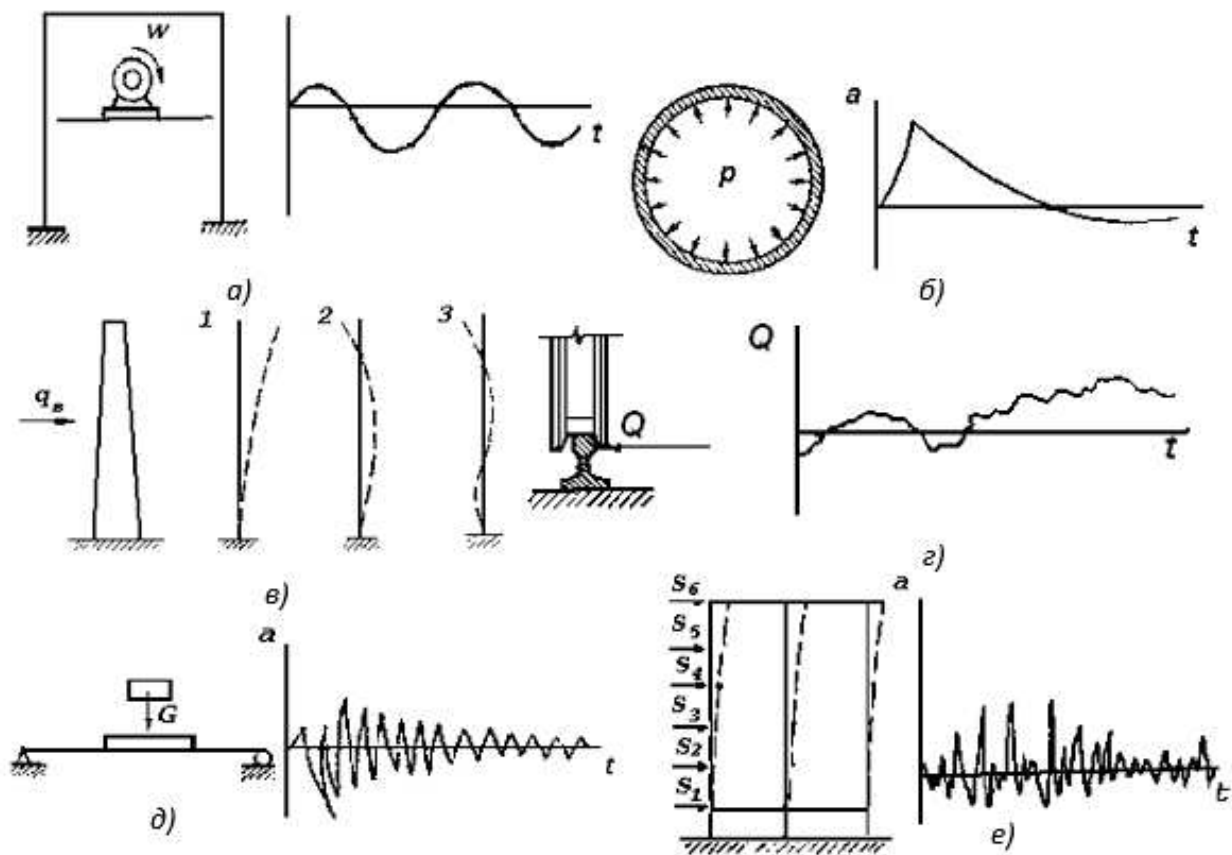


Рис. 1. Види динамічних навантажень та викликані відповідно коливання: *a* – нерухоме; *б* – рухоме від поперечних сил мостового крану; *в* – імпульсивне при раптовій зміні тиску; *г* – ударне; *д* – коливання димової труби від вітру; *е* – сейсмічне.

Таким чином, динамічне навантаження викликається роботою машин та обладнання з неврівноваженими масами, транспортними засобами, вибухами та ударами, поривами вітру, морської хвилі, сейсмічними та іншими впливами. У будівельних конструкціях під дією динамічних навантажень виникають коливання, переміщення та деформації, зусилля та напруги. Причому, якщо результат впливу статичного навантаження визначається величиною, вплив

динамічного навантаження оцінюється як її величиною, так передусім характером впливу. При цьому доводиться зважати: на руйнівну дію вібрації на конструкцію у зв'язку зі втомним зниженням міцності матеріалу; з динамічною стійкістю споруди або ґрунту основи; зі шкідливим впливом вібрацій на організм людей і нормальну роботу технології.

Розглянемо дію навантаження, яке називається динамічним, тобто таким, що визиває суттєві прискорення часток конструкції в процесі її деформування або руху всієї конструкції в цілому.

Результати досліджень. Дія динамічного навантаження характеризується швидким наростанням напружень та деформацій. При цьому опір матеріалів деформуванню значно відрізняється від його опору статичному навантаженню. Наприклад, при миттєвому розтягу матеріала до напружень, перевищуючих статичну границю міцності руйнування настане не зразу, а через деякий час. Крім цього при динамічній дії сили суттєво змінюється пластична ділянка діаграми розтягу. Розрізняють три види динамічного навантаження з точки зору опору матеріалів: сили інерції; ударна дія сил; пружні коливання. Відповідно до цього в опорі матеріалів розглядають три види задач динаміки: 1) задачі на врахування сил інерції; 2) задачі на ударне навантаження; 3) задачі на коливання.

Методика інженерних розрахунків на дію динамічного навантаження в опорі матеріалів будується на спрощуючих гіпотезах, в результаті яких динамічні фактори (зусилля, напруження, деформації, переміщення) виражаються через відомі вже нам статичні за допомогою введення так званого динамічного коефіцієнта k_d :

$$F_d = k_d \cdot F_{st}; N_d = k_d \cdot N_{st}; \sigma_d = k_d \cdot \sigma_{st}; \Delta_d = k_d \cdot \Delta_{st} \quad (1)$$

Більш детально розглянемо дію ударних навантажень, так як наведені нижче дослідження будуть проводитися саме на ці види навантажень.

Навантаження зветься ударним, якщо воно прикладається за дуже короткий проміжок часу (миттєво). Удар виникає при падінні одного тіла на інше. При цьому швидкість ударника швидко падає до нуля, а напруження в стержні, сприймаючому удар, досягають найбільших значень. Потім система стержень-ударник буде здійснювати пружні коливання, які через деякий час закінчаться (затухнуть), а напруження і переміщення зменшаться до величин, відповідаючих статичному прикладенню ваги ударника.

Необхідно відзначити, що точний розв'язок задачі на удар досить складний. Труднощі обумовлені хвильовим характером деформацій, пластичними властивостями матеріалів ударника та стержня та ін. Для спрощення в опорі матеріалів вводиться ряд гіпотез.

Розглядається удар, який викликає лише пружні деформації. Вважається, що ударник не відскакує, а "прилипає" до стержня і далі весь час рухається з ним як одне ціле. Також вважається, що ударник не деформується (абсолютно жорсткий), а деформації у стержні при ударі розповсюджуються вздовж усього стержня, задовольняючи закон Гука, як і при статичному навантаженні.

Розрізняють удари (рис. 2): I – за орієнтацією руху ударника по відношенню до стержня: поздовжній (розтягуючий *a*, стискуючий *з, б*) і поперечний (згинальний *в, д*, скручуючий *е*); II – за орієнтацією руху ударника по відношенню до землі: вертикальний (*а, б, в, е*) та горизонтальний (*з, д*).

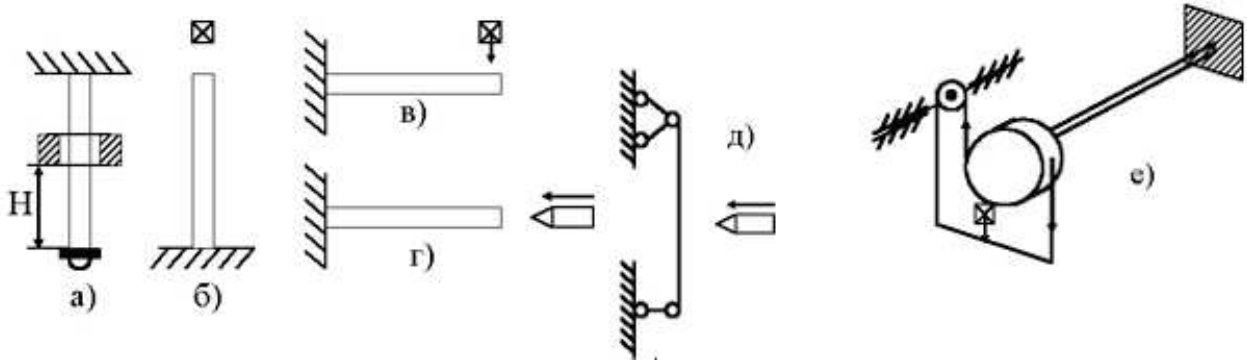


Рис. 2. Види ударних навантажень

Головна (принципова) різниця між вертикальним та горизонтальним ударами полягає у тому, що у другому випадку, на відміну від першого, в ударі приймає участь лише маса ударника, і не впливає його вага. На рисунку 3 представлені різні види ударного навантаження з точки зору деформації.

Теорія удару дуже складна, оскільки швидкість елементів конструкцій на протязі малого проміжку часу змінюється від максимальної до нульової. При цьому виникають значні сили інерції, спричинені великими прискореннями (сповільненнями). Час співударяння невідомий, крім того, виникають пластичні деформації в точці удару, місцеве збільшення температури та інші фактори, врахування яких ускладнює розрахунок.

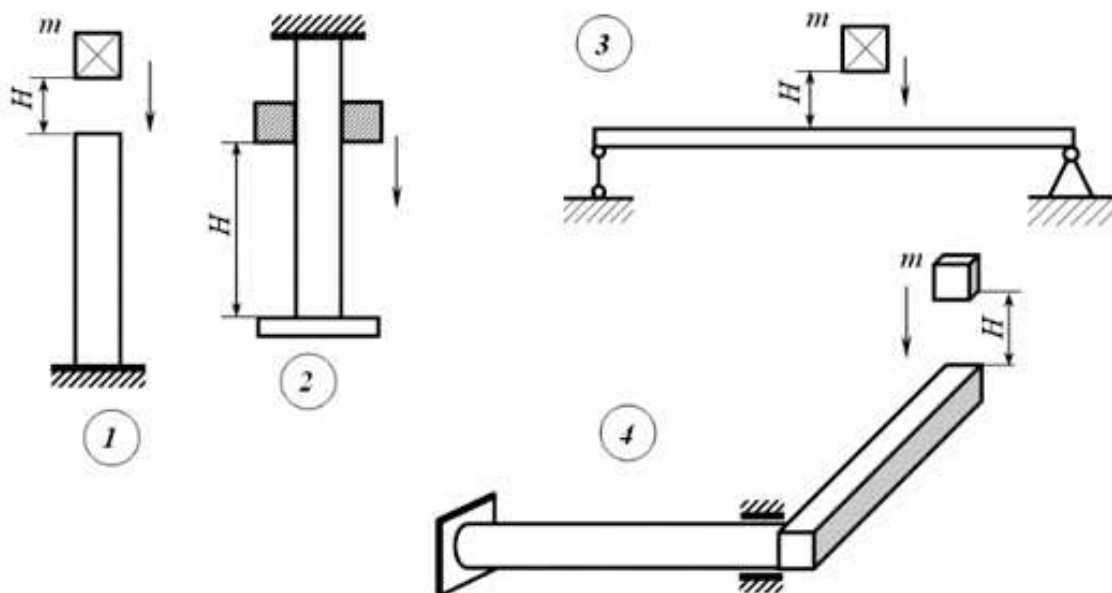


Рис. 3. Види ударних навантажень з точки зору деформації: 1 – ударне навантаження спричинює деформацію стиску; 2 – деформація розтягу від удару; 3 – згинальний удар; 4 – крутильний удар для ділянки стержня з круговим перерізом і згинальний для стержня з квадратним перерізом

Встановлення коефіцієнта динамічності. Бетон пружно-пластичний матеріал, який при дії статичних навантажень чітко проявляє пластичні властивості. Водночас, при дії динамічних навантажень бетон, може вести себе по різному, а саме: витримувати значні динамічні впливи, при цьому збільшуючи статичний опір стиску, розтягу або сколюванню, або руйнуватись під дією значних динамічних навантажень [2, 3]. Вважається, що чим менше тривалість дії динамічних навантажень тим більше перевищує динамічний опір статичний. Така тривалість складає десяті частини секунд, або декілька секунд, якщо за цей час навантаження не зменшиться то бетон зруйнується.

Варто зазначити, що зустрічаються випадки зменшення динамічного опору бетону в порівнянні зі статичним [3, 4], це притаманно крихким високоміцним бетонам, що обов'язково необхідно враховувати при проектуванні складів високоміцних бетонів. Типові діаграми деформування бетону при статичній та динамічній дії показані на рис.4.

Повні діаграми деформування бетонів та фібробетонів при статичній дії навантаження отримують на спеціальному пресовому обладнанні, приймаючи постійну швидкість зростання деформацій. Існують також теоретично обґрунтовані методи отримання повних діаграм із діаграм отриманих на звичайному пресовому обладнанні.

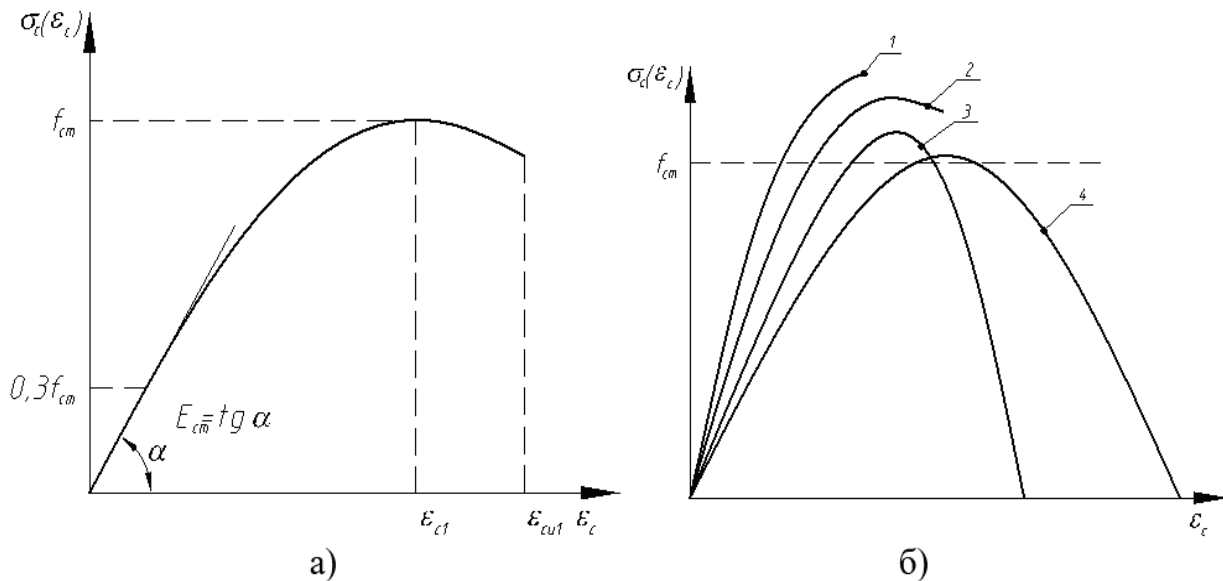


Рис. 4. Типові діаграми деформування бетону при:

- а) статичній дії навантаження;
- б) динамічній дії: 1, 2 - відбулося руйнування зразка; 3, 4 - руйнування не відбулося [2]

Отримати діаграми деформування при динамічному навантаженні значно важче. Це пов'язано з тим, що процеси при динамічних впливах відбуваються миттєво. Параметри таких діаграм змінюються у залежності від швидкості навантаження. При розрахунку конструкцій на динамічну дію навантаження

використовують залежність міцності бетону від часу навантаження, або від швидкості наростання напруження або деформацій. Таким чином розглядають міцність бетону від часу навантаження. Залежність міцності бетону від часу навантаження визначається швидкістю наростання напружень, які визначають за виразом

$$\sigma = \frac{f_d}{\tau}, \quad (2)$$

де σ – швидкість зростання навантаження, $кг/(см^2с)$; τ – час навантаження, $с$; f_d – відповідний розрахунковий опір бетону, $кг/см^2$.

Даний параметр характеризує роботу бетону лише на висхідній ділянці діаграми (рис. 4). В багатьох експериментах [2, 3, 4] спостерігається певна затримка в руйнуванні, після досягнення максимальних напружень. Це підтверджує наявність низхідної ділянки діаграми деформування бетону при динамічних навантаженнях. Приймаючи швидкість деформування постійною, її можна визначити при відомих граничних деформаціях за формулою

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\tau}, \quad (3)$$

де ε – швидкість зростання деформацій, $с^{-1}$; τ – час навантаження, $с$; ε_u – відповідні граничні деформації бетону.

В загальному розглядаючи динамічні характеристики бетонів та фібро бетонів розглядають наступні – тріщиностійкість, ударна витривалість або в'язкість [5, 6]. Тріщиностійкість визначається здатністю витримувати ударні навантаження без утворення тріщин. Для фібробетонів прийнято визначати міцнісні характеристики на стандартних зразках не тільки без тріщин, а й за певної ширини їх розкриття [7, 8, 9].

Під поняттям ударна в'язкість, у загальному розуміють роботу затрачену на руйнування зразка, віднесену до площі його поперечного перерізу [10]. Площу визначають у місці надрізу. Ударна в'язкість визначається за виразом

$$КС = \frac{A}{F}, \quad (4)$$

де $КС$ – ударна в'язкість матеріалу, $Дж/м^2$; A – робота затрачена на руйнування зразка, $Дж$; F – площа поперечного перерізу зразка, в місці надрізу, $м^2$.

Роботу затрачену на руйнування зразка визначають використовуючи загально прийняті поняття потенціальної та кінетичної енергії. Для бетонів та фібробетонів ударну в'язкість визначають у залежності від виду напружено-деформованого стану (стиск, розтяг, розколювання). Ударна в'язкість це якісна характеристика, її не можна використати у розрахунках міцності, але вона дає змогу оцінити особливу властивість матеріалів – схильність до крихкого руйнування в умовах складного напружено-деформованого стану.

До основних міцнісних характеристик бетону при дії динамічних навантажень відносять: динамічну міцність бетону на стиск, розтяг та розколювання.

Міцнісні характеристики бетону при динамічних впливах прийнято оцінювати по відношенню до його статичних міцнісних характеристик коефіцієнтами динамічності. У загальному коефіцієнти динамічності визначаються за виразами

$$DEF_c = \frac{f_{cd}}{f_c}, \quad DEF = \frac{f_{td}}{f_t}, \quad (5)$$

де DEF_c , DEF – коефіцієнти динамічності при стиску та розтягу, відповідно, f_c , f_t – міцність бетону на стиск та розтяг при статичній дії навантаження, відповідно, f_{cd} , f_{td} – міцність бетону на стиск та розтяг при динамічній дії навантаження, відповідно.

В окремих випадках міцність бетону на розтяг замінюють міцністю бетону на розколювання, яка дозволяє отримувати більш достовірні дані, та значно спростити установки по випробуванню зразків на динамічні дії.

Найголовніші питання, які необхідно детально розглянути наступні:

1. Кореляційні зв'язки між міцністю при стисканні, розтяганні та розколі при дії динамічних впливів.

2. Залежність граничних деформацій бетонів різних видів від динамічних впливів.

Дослідженням щодо роботи бетону за динамічних навантажень присвятили свої роботи чимало вчених. Ю.М. Баженов та його учні [2] відмічають, що коефіцієнт динамічного зміцнення залежить від часу дії навантаження (τ). Вони пропонують залежність для визначення коефіцієнта динамічності при стиску, яка справедлива у діапазоні часу $\tau = 1 \div 2000$ мсек

$$DEF_c = 1,58 - 0,351 \lg \tau + 0,07 (\lg \tau)^2, \quad (6)$$

де τ – час навантаження, мсек,

Коефіцієнт динамічності при розтягуванні має аналогічний вираз, але його значення дещо менші

$$DEF = 1,42 - 0,151 \lg \tau + 0,01 (\lg \tau)^2, \quad (7)$$

Коефіцієнт динамічності при зрізі [1] залежно від часу навантаження встановлюється за формулою

$$DEF_r = 1,42 - 0,141 \lg \tau + 0,01 (\lg \tau)^2. \quad (8)$$

Більш сучасні дослідження встановлюють коефіцієнт динамічного зміцнення у залежності від швидкості зміни напружень σ або деформацій ε . Так авторами [11] за результатами статистичної обробки значної кількості експериментальних даних рекомендовані наступні залежності:

- для ударного стиску

$$\begin{cases} DEF_c = 1,212 + 0,0424 \lg \varepsilon & \text{при } 1 \times 10^{-5} \leq \varepsilon \leq 1 \text{ c}^{-1}; \\ DEF_c = 1,212 + 0,044 \lg \varepsilon & \text{при } 1 \leq \varepsilon \leq 10^2 \text{ c}^{-1}, \end{cases} \quad (9)$$

- для ударного розтягу

$$\begin{cases} DEF = 1,9 + 0,18 \lg \varepsilon & \text{при } 1 \times 10^{-5} \leq \varepsilon \leq 1 \text{ c}^{-1}; \\ DEF = 1,9 + 2,582 \lg \varepsilon & \text{при } 1 \leq \varepsilon \leq 10^2 \text{ c}^{-1}. \end{cases} \quad (10)$$

Аналогічні вирази запропоновані у [12, 13]

$$\begin{cases} DEF_c = 1,38 + 0,08 \lg \varepsilon & \text{при } \varepsilon > 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}, \\ DEF_c = 1,14 + 0,03 \lg \varepsilon & \text{при } \varepsilon < 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}; \end{cases} \quad (11)$$

Норми ЕКБ ФІБ [15] залежності коефіцієнтів динамічності при стисненні та розтяганні в діапазоні швидкостей $30 \times 10^{-6} - 300 \text{ c}^{-1}$ описують наступною системою рівнянь

$$\begin{cases} DEF_c = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1,026\alpha_s} & \text{при } 30 \times 10^{-6} \leq \varepsilon \leq 30 \text{ c}^{-1}; \\ DEF_c = \gamma_s \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{sc}} \right)^{1/3} & \text{при } 30 \leq \varepsilon \leq 300 \text{ c}^{-1}, \end{cases} \quad (12)$$

де

$$\alpha_s = \frac{1}{5 + 9 f_c / f_{c0}}, \quad (13)$$

$$\gamma_s = 10^{(6,15\alpha_s - 2)}. \quad (14)$$

У виразах (12), (13): ε – швидкість зростання деформацій, c^{-1} ; f_c – міцність бетону на стиск при статичній дії навантаження, МПа; $f_{c0} = 10$ МПа; $\varepsilon_{sc} = 30 \times 10^{-6} \text{ c}^{-1}$.

Аналогічні вирази при розтязі мають наступний вигляд

$$\begin{cases} DEF = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{st}} \right)^{1,016\delta_s} & \text{при } 3 \times 10^{-6} \leq \varepsilon \leq 30 \text{ c}^{-1}; \\ DEF = \beta_s \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{st}} \right)^{1/3} & \text{при } 30 \leq \varepsilon \leq 300 \text{ c}^{-1}, \end{cases} \quad (15)$$

де

$$\delta_s = \frac{1}{10 + 6 f_{ct} / f_{c0}}, \quad (16)$$

$$\beta_s = 10^{(7,112\delta_s - 2,33)}. \quad (17)$$

У виразах (15), (16): f_{ct} – міцність бетону на розтяг при статичній дії навантаження, МПа; $\varepsilon_{st} = 3 \times 10^{-6} \text{ c}^{-1}$.

Для опису напружено-деформованого стану при динамічних навантаженнях та впливах, суттєве значення мають не тільки міцнісні, а й деформаційні характеристики. Деформаційні характеристики приводять у залежності від швидкості зростання деформацій та класу бетону.

Дослідження проведені [12, 13] вказують на можливість описання граничних деформацій неармованого бетону при максимальних значеннях напружень за виразами

$$\begin{cases} \varepsilon_{c1,d} = (1,3 - 0,061 \lg \varepsilon + 0,01 f_c) \times 10^{-3} \text{ при } \varepsilon > 1,6 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}, \\ \varepsilon_{c1,d} = (0,5 - 0,231 \lg \varepsilon + 0,01 f_c) \times 10^{-3} \text{ при } \varepsilon < 1,6 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}. \end{cases} \quad (18)$$

Для визначення граничних деформацій неармованого бетону запропоновані такі формули

$$\begin{cases} \varepsilon_{cu,d} = \left(0,7 - 6 \left(\frac{f_c}{6,9} \right)^{-0,7} \lg \varepsilon_c \right) 10^{-3} \text{ при } \varepsilon > 1,6 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}, \\ \varepsilon_{cu,d} = \left(0,7 - 1,25 \left(\frac{f_c}{6,9} \right)^{-0,7} \lg \varepsilon_c \right) 10^{-3} \text{ при } \varepsilon < 1,6 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}. \end{cases} \quad (19)$$

Розглянуті вирази встановлення динамічних параметрів бетонів мають доволі великий діапазон значень, який виникає у наслідок багатьох факторів. У першу чергу, це різні методи випробувань та різна точність вимірювального лабораторного обладнання, різні розміри зразків та температурно-вологісні умови, різні заповнювачі та в'яжучі, з яких виготовлявся бетон і т.д.

Порівняння теоретичних досліджень з експериментальними.

Детальний розгляд запропонованих питань необхідний в першу чергу для того, щоб показати більш сучасні підходи по встановленню основних залежностей. Застосування та обґрунтування загально прийнятих гіпотез та поширення, їх на динамічні явища та впливи, у порівнянні з емпіричними виразами отриманими для певних умов, значно розширить діапазон задач, безпосередньо пов'язаних із динамічними впливами.

При статичних навантаженнях загальновідомі формули Коші [14], які дозволяють із достатньою точністю встановлювати значення міцності бетону при різного роду деформування, у залежності від міцності на стиск:

- міцність на розтяг при згині $0,08(10f_c)^{2/3}$;
- міцність при розколюванні $0,055(10f_c)^{2/3}$;
- міцність на осьовий розтяг $0,046(10f_c)^{2/3}$;
- міцність при зрізі $0,093(10f_c)^{2/3}$;
- міцність при сколюванні $0,0162(10f_c)^{2/3}$.

Узагальнюючи вищенаведені вирази, запропонуємо вираз для визначення міцності бетону на розтяг у вигляді

$$f_t = k(10f_c)^{2/3}, \quad (20)$$

де k – коефіцієнт, який залежить від виду бетону, вмісту фібри, крупності заповнювача і т.д.

Сформулюємо гіпотезу про справедливість формули Коші записаної у вигляді (6) при динамічних навантаженнях. Таким чином можна записати

$$f_{t,d} = f(f_{c,d}) = k(10f_{c,d})^{2/3}, \quad (21)$$

де $f_{t,d}$ – міцність бетону на розтяг при дії динамічних навантажень, $f_{c,d}$ – міцність бетону на стиск при дії динамічних навантажень.

Динамічна міцність бетону при стиску виражається залежністю

$$f_{c,d} = f_c \times DEF_c, \quad (22)$$

де f_c – міцність бетону на стиск при статичному навантаженні, DEF_c – коефіцієнт динамічного зміцнення при стисканні.

Підставимо формулу (8) у вираз (7), та виконаємо нескладні перетворення

$$f_{t,d} = k(10f_c \times DEF_c)^{2/3} = k(10f_c)^{2/3} DEF_c^{2/3}. \quad (23)$$

З урахуванням виразу (6) отримаємо

$$f_{t,d} = f_t \times DEF_c^{2/3}. \quad (24)$$

Виразимо динамічну міцність бетону при розтязі

$$f_{t,d} = f_t \times DEF, \quad (25)$$

де f_t – міцність бетону на розтяг при статичному навантаженні, DEF – коефіцієнт динамічного зміцнення при розтязі.

Остаточно прирівнявши вирази, отримаємо значення коефіцієнта динамічності при розтязі у залежності від його значення при стиску

$$DEF = DEF_c^{2/3}. \quad (26)$$

Аналогічний вираз можна отримати для опору на зріз та розколювання. Для цих видів деформацій він буде однаковим. Це дає можливість отримувати динамічні характеристики лише за певного виду деформування, з використанням простих лабораторних установок.

Для підтвердження справедливості виразу (26) було виконане порівняння із загально відомими виразами Ю.М. Баженова та В.С. Удальцова [2] для розтягу та розколювання (рис. 5). Середнє значення відхилень усереднених експериментальних даних від значень обрахованих за виразом (12) складає – 0,979%, стандартне відхилення – 2,15%, коефіцієнт варіації – 0,46%. Це вказує на прийнятність запропонованого підходу. Та можливості проведення випробувань на розколювання з подальшим визначенням необхідних характеристик. Додатковим підтвердженням, може слугувати загально відомий бразильський тест, де визначення динамічних характеристик виконують при розколюванні зразків.

Основна перевага запропонованого методу полягає в тому, що відпадає необхідність у визначенні емпіричного коефіцієнту k , який залежить від багатьох параметрів і може мати різні значення, навіть, при одному виді бетону.

Встановлений вираз дозволяє отримувати достовірні експериментальні дані коефіцієнта динамічного зміцнення при різних видах деформацій, отримуючи експериментальні значення лише за певного виду деформацій. Насамперед, це необхідно при виборі експериментальної установки. Так випробування стандартних зразків на стиск пов'язано з необхідністю створення значної енергії удару. Це створити у лабораторних умовах доволі складно, та неможливо без застосування спеціального устаткування. Установки по випробуванню на зріз потребують набагато меншу енергію удару, та дозволяють отримувати достовірні експериментальні дані в лабораторних умовах на простих копрових установках, а запропоновані вище вирази дають змогу визначати коефіцієнти динамічного зміцнення бетонів при деформаціях різного виду. Проведені експериментальні дослідження повністю підтвердили наведені вище твердження.

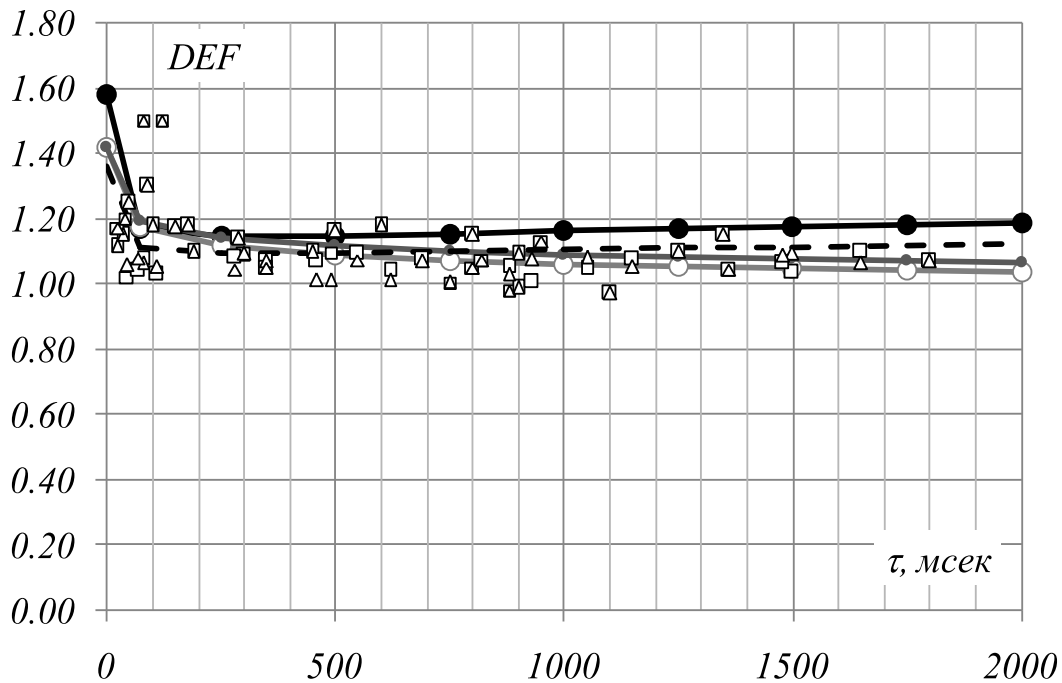


Рис. 5. Коефіцієнти динамічності для важкого бетону:

- коефіцієнт динамічності при стиску за Баженовим Ю.М. (6);
- коефіцієнт динамічності при розтягуванні за Баженовим Ю.М. (7);
- коефіцієнт динамічності при розколюванні за Баженовим Ю.М. (8);
- - коефіцієнт динамічності при розтязі та розколюванні за виразом (26)
- експериментальні дані по визначенню коефіцієнта динамічності при розтязі;
- △ експериментальні дані по визначенню коефіцієнта динамічності при розколюванні

Для додаткового підтвердження викладених вище тверджень визначимо відносну похибку виразів визначення коефіцієнтів динамічності при розтязі (7) та розколюванні (8).

$$\Delta = \frac{DEF_r - DEF}{DEF} \times 100 = \frac{0,01 \lg \tau}{1,42 - 0,15 \lg \tau + 0,01 (\lg \tau)^2} \times 100\%. \quad (27)$$

Підставимо у вираз (22) нижню та верхню межу часу дії навантаження, та визначимо похибку. При $\tau=2000$ мс похибка $\Delta=3,19\%$, при $\tau=1$ мс $\Delta=0\%$.

Як вказувалось раніше, деформаційні характеристики при дії динамічних впливів мають суттєве значення в сучасному розрахунковому апараті. Для більшості інженерних задач їх використання ускладнене тим, що вони залежать від швидкості зміни деформацій або напружень. Тому вирази визначення граничних деформацій бетону при динамічних впливах приведемо до більш зручних виразів, які у загальному повинні мати наступний вигляд

$$\varepsilon_{cl,d} = f(DEF_c, f_c) \quad (28)$$

$$\varepsilon_{cu,d} = f(DEF_c, f_c) \quad (29)$$

Шляхом не складних перетворень виразів (11) і (18) отримаємо формули аналогічні (28, 29) для знаходження граничних деформацій бетону $\varepsilon_{cl,d}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{cl,d} = \left(2,352 - 0,763 \frac{f_{c,d}}{f_c} + 0,01 f_c \right) \times 10^{-3} \text{ при } \varepsilon > 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}, \\ \varepsilon_{cl,d} = \left(9,24 - 7,666 \frac{f_{c,d}}{f_c} + 0,01 f_c \right) \times 10^{-3} \text{ при } \varepsilon < 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}, \end{array} \right. \quad (30)$$

або

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{cl,d} = (2,352 - 0,763 \times DEF_c + 0,01 f_c) \times 10^{-3} \text{ при } \varepsilon > 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}, \\ \varepsilon_{cl,d} = (9,24 - 7,666 \times DEF_c + 0,01 f_c) \times 10^{-3} \text{ при } \varepsilon < 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}. \end{array} \right. \quad (31)$$

Встановимо аналогічні формули для $\varepsilon_{cu,d}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{cu,d} = \left(0,7 - 75 \left(\frac{f_c}{6,9} \right)^{-0,7} (DEF - 1,38) \right) 10^{-3} \text{ при } \varepsilon > 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}, \\ \varepsilon_{cu,d} = \left(0,7 - 41,67 \left(\frac{f_c}{6,9} \right)^{-0,7} (DEF - 1,14) \right) 10^{-3} \text{ при } \varepsilon < 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}. \end{array} \right. \quad (32)$$

Максимально можливі деформації бетону $\varepsilon_{cu,d}$ пропонується також визначати за екстремальним критерієм, з урахуванням стійкого руйнування, яке в багатьох випадках задовольняється при напруженнях у бетоні не нижче $0,8f_c$. Для розтягнутої зони фібробетонних конструкцій граничні деформації необхідно приймати рівними – граничним деформаціям фібри. Такі деформації, як правило складають не менше $0,0100$. Для більш точного їх визначення необхідно проводити експериментальні випробування балок на згин, із побудовою діаграми деформування за стандартами [7, 8, 9].

Опір бетонів динамічним впливам характеризується поняттям вибухостійкості [5]. Вибухостійкість прийнято характеризувати двома коефіцієнтами опору вибуху k_{exp} та опору відколу k_{ch} . Для важкого бетону C20/25 $k_{exp}=0,15$ та $k_{ch}=0,45$, а для залізобетону $k_{exp}=0,1$, а $k_{ch}=0,35$. Дані коефіцієнти залежать від багатьох параметрів, найголовніший із яких це –

динамічна міцність. Вибухостійкість бетону підвищується, а коефіцієнти приймають менші значення при збільшенні динамічної міцності.

Пробій бетону або проникнення при ударі характеризується коефіцієнтом піддатливості проникненню. Даний коефіцієнт також залежить від багатьох параметрів матеріалу: твердості, міцності, деформативності і густини.

Окремі складні питання із динамічними характеристиками бетону виникають при попередній дії значних статичних та температурних навантажень. При цьому останні можуть діяти одночасно з динамічними. Що також значно ускладнює задачі дослідження.

В переважній більшості робіт присвячених роботі бетону на динамічні впливи [1, 2, 3, 4] вказується на залежність його основних механічних параметрів від часу або швидкості дії навантаження, а також виду напружено-деформованого стану. Прийнято розглядати міцність бетону при стисканні, розтягуванні та сколюванні. Тому далі будемо розглядати властивості бетонів та фібро бетонів у залежності від виду напружено-деформованого стану.

Висновки. 1. Теоретично обґрунтовані та отримані вирази для визначення коефіцієнта динамічного зміцнення та граничних деформацій при динамічних впливах. Запропоновані вирази розкривають широкі можливості по проведенню узагальненню та аналізу експериментальних даних при дії динамічних впливів.

2. Проведена експериментальна перевірка отриманих виразів (див. рис. 5), яка показала їх достатню точність для інженерних розрахунків.

3. Обґрунтована можливість отримання достовірних даних на простому копровому обладнанні в лабораторних умовах.

1. GARA O.A. Basics of metrology and standardization in construction. Odesa. Polygraph 2016, 258 p.

2. BABICH E.M., KOCHKARYEV D.V., FILIPCHUK S.V.. Evaluation of strength and deformation characteristics of high-strength concrete under dynamic influences. "Science and construction" Journal - Kyiv: NDIBK, 2017. - No. 4. - pp. 15-21.

3. DVORKIN L.Y., BABICH E.M., ZHITKOVSKIY V.V. and other. High-strength fast-hardening concretes and fiber concretes - Rivne: NUVHP, 2017. 331 p.

4. BELOBROV I.K., TIKHONOV I.N. Strength of eccentrically compressed reinforced concrete elements under single dynamic loading to failure // Seismic construction / - 1975. - No. 2. - C10-16.

5. KARPENKO O.A. Analysis of research in the field of reliability of reinforced concrete elements // Building materials, products and sanitary equipment 2012. 81 – 86p.

6. WANG. L., HU X. Z., HUANG Y. L., LI Y. C. Dynamic tensile strength tests for steel fiber reinforced concrete. Journal of Vibration and Shock, 2011. Vol. 30 Issue (10). P. 50–53.

7. EN 14488-5:2006 Testing sprayed concrete. Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens.

8. EN 14651:2005+A1:2007 Test method for metallic fiber concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).

9. EN 14845-2:2006 Test methods for fibers in concrete. Effect on concrete.
10. PISARENKO H.S., KVITKA O.L., UMANSKY E.S.. Resistance of materials: High school, 2004. – 655 p.
11. KOCHKAREV D.V. Nonlinear resistance of reinforced concrete elements and structures to force effects: Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Sciences. – Rivne: 2017. – 467p.
12. KUFUOR K.G., PERRY S.H. Hard impact of shallow reinforced concrete domes. Int. Conf. Structural Impact and Crashworthiness: Int. Conf. – V.2. – London, 1984. – P.675-686.
13. BABICH E.M., KOCHKARYEV D.V., FILIPCHUK S.V. Evaluation of strength and deformation characteristics of high-strength concrete under dynamic influences. "Science and construction" Journal - Kyiv: NDIBK, 2017. - No. 4. - S. 15-21.
14. DVORKIN L.I. Fundamentals of concrete science / L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin // K: Osnova, 2007. 616 s.
15. Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code 1990, Redwood Books, Trowbridge, Wiltshire, UK, 1993., P.461.
16. ZALOMIN D.O. Coefficient of dynamic strengthening of steel fiber reinforced concrete under tension // Modern science-intensive technologies №2. - M.: DIA Publishing House, 2004. - P. 150-151.
17. BABYCH, Y., FILIPCHUK S., FENKO, O. Mathematical modeling of the resistance of pulling out steel bars from high strength concrete / International Journal of Engineering and Technology (UAE), vol. 7 (3.2), pp. 516-521, May 2018. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.2.14581.
18. BABICH, Y., FILIPCHUK S., KARAVAN, V., SOBCZAK-PIASTKA, J. Research of basic mechanical and deformative properties of high-strength fast-hardening concretes/ AIP Conference Proceedings – 2019. DOI: 10.1063/1.5091864.
19. BABICH, Y., FILIPCHUK S., KARAVAN, V., SOBCZAK-PIASTKA, J. General requirements for materials of fortification protective structures / AIP Conference Proceedings – 2019. DOI: 10.1063/1.5091865.
20. BABICH, Y., FILIPCHUK S., KARAVAN, V., SOBCZAK-PIASTKA, J., NALEPA O. Research of deformative properties of concrete taking into account the descending branch of deformation/ // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 960 (3). DOI: 10.22630/aspa.2020.19.3.26.