

МІЦНІСТЬ ФІБРОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ МІСЦЕВОМУ СТИСНЕННІ

Кузнєцова І. Г.

ВСТУП

Фібробетон – новий будівельний матеріал, вірно лише частково. Його історія налічує кілька тисячоліть. Ще древні єгиптяни помітили, що якщо в глину, призначену для зведення житла, попередньо додати соломку, очерет або овечу вовну, то стіни набувають підвищену міцність і тріщиностійкість. Так з'явився саман – далекий предок сучасного фібробетону¹.

У 1874 р. А. Берард запатентував добавку до бетону, котра представляла собою його неоднорідну суміш з гранульованими відходами заліза. У 1918 р. у Франції Х. Альфсен винайшов метод армування за допомогою сталевих або дерев'яних волокон. Через 25 років у Великобританії був отриманий перший фібробетон у сучасному розумінні². У 1950-х під керівництвом Ромуалді були опубліковані статті про механіку тріщиноутворення для сталевих фібробетонів, з чим, практично одночасно з'явилася можливість виготовлення волокон з полімерних, мінеральних, вуглецевих і т. п. матеріалів. Таким чином, у 1970-х дисперсне армування бетонів сталевими волокнами стало життєздатною альтернативою стержневому армуванню³. У зв'язку з цим підвищився інтерес науковців до отримання недорогих і міцних композиційних матеріалів, у тому числі до технологій виготовлення фібробетонів. У 1976 р. його вперше застосували в колишньому СРСР при будівництві злітно-посадкової смуги аеродрому, але тоді він не отримав широкого розповсюдження, головним чином через недосконалість як технології його виготовлення, так і самої фібри.

¹ Войлоков І.А., Канаєв С.Ф. Базальтофібробетон. Исторический экскурс. *Инженерно-строительный журнал*. 2009. №4. С. 26–31.

² Tehrani F.M. Performance of Steel Fiber-reinforced Concrete in Beam-column Connections : a dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Civil Engineering, University of California, Los Angeles, 2008, 413 p.

³ Abbas U. Materials Development of Steel-and Basalt Fiber-Reinforced Concretes. Norwegian University of Science and Technology, 2013, 162 p.

У практиці будівництва досить часто зустрічаються випадки передачі на бетонні стінові або фундаментні елементи великих зосереджених навантажень. В якості прикладу можна навести обпирання залізобетонних колон нахиленої колонади на оболонку та стіну басейну гіперболічної градирні, залізобетонних колон багатопверхових будинків або опор висячих стін на бетонні елементи різної висоти, товщини й розмірів у плані, які входять до складу цокольної, підвальної або інших конструктивних частин будівель (споруд). При цьому виникає місцеве стиснення бетону в конструктивних елементах та ймовірність їх руйнування від зминання або продавлювання залежно від геометричних розмірів, які підпадають під прийняті у нормативних документах відповідні розрахункові схеми.

Одним із резервів підвищення експлуатаційної надійності бетонних елементів, є удосконалення методів їх розрахунку. Слід перейти від емпіричних залежностей при розрахунках за схемами зминання, характерних як для старих, так і чинних норм, на інші альтернативні їм схеми, наближені до результатів експериментальних досліджень з урахуванням напружено-деформованих станів та характерній кінематиці їх руйнування. Бетонні елементи слід розглядати як окремий випадок залізобетонних елементів при нульовому або конструктивному відсотку поздовжнього або непрямого армування. Отже розв'язання задачі міцності при місцевому стисненні є актуальною задачею.

1. Галузі застосування, види, переваги та недоліки й особливості технології виготовлення фібробетонів на базальтовому волокні

Фібробетон – композитний матеріал, який містить гідралічне в'язуче, мілкий, іноді, і великий заповнювач, дисперсні волокна із різних матеріалів та геометрії. Зміцнення волокнами ґрунтується на припущенні, що бетонна матриця передає їм прикладене навантаження за допомогою дотичних сил, які діють за поверхнею розділу. У разі, якщо модуль пружності волокна більший, ніж у цементної матриці, вважається, що основну частину прикладених навантажень сприймають волокна, а загальна міцність композиційного матеріалу пропорційна їх об'ємному вмісту⁴.

Армування бетону фіброю сприяє збільшенню його міцності: межа міцності при розтязі, стисненні та згині збільшується, підвищується ударна міцність. Значно зростає надійність бетонних конструкцій, їх довговічність, стійкість до утворення тріщин, деформативність,

⁴ Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. 3 изд. Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2011.

зчеплення, зносостійкість, морозостійкість, термостійкість, водонепроникність, екологічна безпека.

Базальтова фібра – є одним з найміцніших мінеральних волокон. Дослідження показують, що якість бетону значно поліпшується навіть при невеликих добавках базальтового волокна. Важливим є те, що застосування такого матеріалу дозволяє, без будь-якого зменшення міцності, знизити масу конструкцій у цілому. Базальтова фібра володіє рядом істотних переваг, починаючи від ціни й високих фізико-технічних характеристик і закінчуючи тим, що її важко підробити.

Базальтові волокна забезпечують бетону тривимірну міцність, вони абсолютно стійкі до фізичних пошкоджень під час перемішування, не піддаються корозії (що характерно для сталеві фібри), легко розподіляється, не утворюючи згустків, навіть при додаванні в уже залиту суміш (на відміну від поліпропіленові фібри).

Структура бетону із застосуванням базальтових волокон (базальтоцемент) близька до структури армоцементу із арматурою зі сталевих сіток. Однак базальтоцемент володіє більш високою міцністю і деформативністю, тому що базальт забезпечує більш високу ступінь дисперсності армування цементного каменю і має більшу міцність, ніж більшість видів сталевих сіток. Крім того, базальтоцемент може сприймати великі пружні деформації, тому що базальтове волокно при розтязі не має пластичних деформацій, а за пружністю перевершує сталь. Значне збільшення деформативності і міцності цементного каменю відбувається за рахунок усунення базальтовими волокнами впливу концентрації напружень.

До областей застосування фібри належить: автодорожня інфраструктура; підрейкова основа залізничного полотна; морські і гідротехнічні споруди; стабілізація відкосів, ухилів і нахилених каналів; збірні бетонні вироби будь-якої складності; торкретування; плити на ґрунтових основах, підлоги.

Найбільш складним етапом при отримання якісного фібробетону є введення волокон у необхідній кількості, забезпечуючи при цьому перемішування складових з рівномірним розподілом армуючих компонентів за об'ємом бетону. Для фібробетонів характерне утворення локальних згустків волокон зазвичай через зчеплення їх анкерних кріплень і взаємного тертя поверхонь волокон, у разі сталеві фібри, а також сил статичної електрики та поверхневого натягу при використанні замаслювачів, у разі синтетичних і мінеральних волокон, відповідно.

В даний час інтерес до вивчення технологій виготовлення фібробетону серед учених з різних країн світу обумовлений необхідністю отримання будівельних матеріалів на основі місцевої сировини з підвищеними експлуатаційними характеристиками, що забезпечують високу енергетичну ефективність, екологічну безпеку і

низьку вартість. У⁵ наведені результати досліджень впливу різних типів волокон (сталевих, на основі полівінілового спирту, базальтових) на властивості бетонної суміші, що самоущільнюється, й одержуваного із неї бетону. Всі типи волокон приводять до збільшення водопотреби суміші для досягнення необхідної легкоукладальності та відповідного зниження міцності при стисканні на 10 – 15%.

В країнах Європи, США, Японії та ін. діє нормативна документація, котра регламентує проектування конструкцій з фібробетону, регулює технологічні способи їх виготовлення, методи випробувань зразків і характеристик фібробетонних сумішей. Більшість із них стосується сталеві фібробетону, однак норми, дозволяють застосовувати органічні та синтетичні волокна.

Базальтова фібра являє собою відрізки комплексного базальтового волокна у вигляді розсіпчастих монофіламентів довжиною 3 – 30 мм, у деяких випадках до 50 мм, діаметром 13 – 20 мкм⁶.

Основні фізико-механічні характеристики базальтових волокон такі: щільність – 2600 кг/м³; міцність на розтяг – 1600 – 3200 МПа; модуль пружності – 1 – 1,3·10⁵ МПа; видовження при розриві – 1,4 – 3,6%⁷.

Відносна деформація цементного каменю без утворення тріщин досягає 0,7 – 0,9%, що в 35 – 45 разів перевищує граничне видовження неармованого каменю. Значне збільшення деформативності і міцності цементного каменю відбувається за рахунок усунення базальтовими волокнами впливу концентрації напружень в місцях, ослаблених структурними дефектами (раковинами, мікротріщинами). Базальтове волокно хімічно інертне, не вступає в реакцію з солями або фарбниками, тому бетони, армовані базальтовими волокнами, застосовують при будівництві морських споруд, і в архітектурному і декоративному бетонах⁸.

Використання базальтового волокна може суттєво полегшити розв'язання проблеми захисту залізобетонних конструкцій від руйнівного впливу корозії⁹.

⁵ Малышев В.Ф. Особенности технологии изготовления сталефибробетонных трубчатых изделий : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1985. 24 с.

⁶ Фудзи, Т. Механика разрушения композиционных материалов / пер. с яп. Т. Фудзи, М. Дзако. Москва: Мир, 1982. 232 с.

⁷ Сарайкина К.А., Голубев В.А., Семкова Е.Н. Щелочестойкость базальтового волокна и способы ее повышения. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2012. № 1. С. 185–192.

⁸ Боровских, И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Казань, 2009. 20 с.

⁹ Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібро бетони / Дворкін Л.Й. та ін.: монографія. Рівне : НУВГП, 2017.

В ¹⁰ наведені результати експериментальних досліджень з визначення міцносних характеристик фібробетона із вмістом базальтового волокна 0,2 – 1%. Автори роблять висновок про те, що можна отримати приріст межі міцності на осьовий стиск до 10 – 25%, а на розтяг – до 15% і пропонують оптимальний діапазон дозування базальтового волокна в межах 0,4 – 0,6% від маси бетону. При більш високому його вмісті спостерігається нерівномірний розподіл фібри за об'ємом бетону, утворення грудок з фібр і, як наслідок, зниження міцності. Однак, рекомендації щодо довжини і діаметру волокна відсутні.

А. Г. Новицький і М. В. Єфремов наводять дані НДіБК, в яких досліджувалися зразки, армовані базальтовим волокном довжиною 10 мм, діаметром більше 40 мкм з коефіцієнтом армування за вагою від 2 до 4 %. За таких умов межа міцності зразків при згинанні зростає до 30% ¹¹. Наголошено на високу термостійкість (до 800°C) базальтового волокна.

Дослідження впливу відсоткового вмісту фібри при згинанні та стиску наведено в ¹², автори використовували базальтове волокно довжиною 6, 12 і 18 мм. З'ясовано, що у разі, якщо довжина волокна більше 12 мм, відбувається утворення так званих «їжаків», що негативно впливає на міцнісні властивості бетону. Досліджувався фібробетон з відсотковим вмістом фібри 0,1 – 0,25% від маси. Найкращі показники мав матеріал з вмістом базальтової фібри 0,2%. Однак дані щодо відсоткового перевищення міцності фібробетону порівняно із неармованим бетоном відрізняється від результатів, отриманих в ¹¹: міцність при згинанні зростала на 100 – 160%, при стисканні – на 35 – 50%. Подальше підвищення вмісту волокна призвело до зниження міцності фібробетону, як і у випадку перевищення довжини фібри певної межі.

Проаналізувавши залежність міцності від довжини, діаметру і відсотка армування, зроблено висновок, що найбільш прийнятним з точки зору міцності є базальтове волокно довжиною 12 мм і

¹⁰ Кудяков К.Л., Невский А.В., Ушакова А.С. Влияние дисперсного армирования базальтовым волокном на прочностные свойства бетона : X Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (23.04-26.04.2013). Томский госуд. Архитек.-строит. Университет. Томск, 2013. С. 708–710.

¹¹ Новицкий А.Г., Ефремов М.В. Аспекты применения базальтовой фибры для армирования бетонов. *Науково-технічний збірник «Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка»*. Київ, 2010. Вип. 36. С. 22–26.

¹² Василевская Н.Г., Енджиевской И.Г., Калугин И.Г. Цементные композиции дисперсно-армированные базальтовой фиброй. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. Томск, 2011. Вип. 3. С. 153–158.

відсотковим вмістом 0,2%, при цьому межа міцності при згинанні порівняно з неармованим зразком збільшується до 3-х разів, а при стисканні в 1,5 рази.

Базальтова фібра ефективно застосовується при виготовленні залізобетонних плит перекриття, фундаментів та інших конструкцій з високим ступенем пожежної безпеки, при влаштуванні фібробетонних підлог, виготовленні піскобетону, торкретбетону і т. п. Існує досвід використання базальтової фібри при будівництві гідроспоруд: введення базальтового фіброволокна дозволяє до 8% скоротити витрату цементу при збереженні технічних характеристик готових виробів.

2. Міцність бетонних елементів при місцевому стисненні

Розрахунок бетонних елементів на місцевий стиск (зминання) виконують при дії стискаючої сили, котра прикладена нормально на обмежену площу поверхні бетонного елемента. При цьому враховується підвищений опір бетону на стиск у її межах за рахунок об'ємного напруженого стану бетону під нею.

Основними факторами, які впливають на опір бетону зминанню, можна вважати: форму та розміри зразка і штампа, схему та спосіб передачі навантаження, вид бетону (табл. 1.1). Існуючі розбіжності в оцінюванні впливу окремих факторів, пов'язані очевидно з різними умовами проведення експерименту (наявність чи відсутність прокладок, що виключають тертя, способом передачі навантаження, сумісною дією декількох визначаючих факторів).

Численні експериментально-теоретичні дослідження бетонних елементів при місцевому навантаженні сприяють більш глибокому вивченню проблеми. Слід відмітити, що найбільш розповсюдженим є емпіричний підхід до розрахунку міцності, при якому особлива увага приділяється визначенню «розрахункової» площі елемента. Разом з цим існує розуміння щодо необхідності врахування впливу висоти елемента¹³, місця розташування навантаження¹⁴, виду бетону¹⁵ та інших факторів впливу¹⁶. При застосуванні емпіричних залежностей

¹³ Roberts-Wolimann C.L., Banta T., Bonetti R. and Charney F. «Bearing Strength of Light-Weight Concrete.» ACI Materials Journal. 2006. 103 (6), pp. 459–66.

¹⁴ Venckevicius V. 2005. «About the Calculation of Concrete Elements Subjected to Local Compression.» Journal of Civil Engineering and Management, 11 (3). 2005. pp. 243–48. Accessed September doi:10.3846/13923730.2005.9636355.

¹⁵ Rak N.A. «Metodyka Rascheta Soprotivleniya Stalefybrobetonnykh Elementov Mestnomu Szhatiyu.» Vestnyk Polotskoho Hosudarstvennogo Unyversyteta. Stroytelstvo. Prykladnye Nauky. Stroytelnye Konstruktsyy. 2017. № 16, pp. 93–97.

¹⁶ Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads / R. Breitenbücher et al..

існує складність врахування багатфакторності впливів і певна неоднозначність в оцінюванні визначальних факторів.

Таблиця 1

Фактори, що впливають на міцність бетонних елементів при місцевому стисненні

№	Назва фактору	Позначення
1	Відношення довжини вантажної площадки і висоти елемента	$\frac{l_{loc}}{h}$
2	Відношення довжини вантажної площадки і довжини елемента	$\frac{l_{loc}}{l}$
3	Відношення сторін елемента	$\frac{h}{l}, \frac{h}{b}$
4	Ексцентриситети прикладання навантаження	e_x, e_y
5	Тертя по контакту між вантажною площадкою і поверхнею елемента	f
6	Клас бетону	$\left(\frac{f_{ctd}}{f_{cd}} \right)$
7	Вид бетону	
8	Сили внутрішнього тертя	

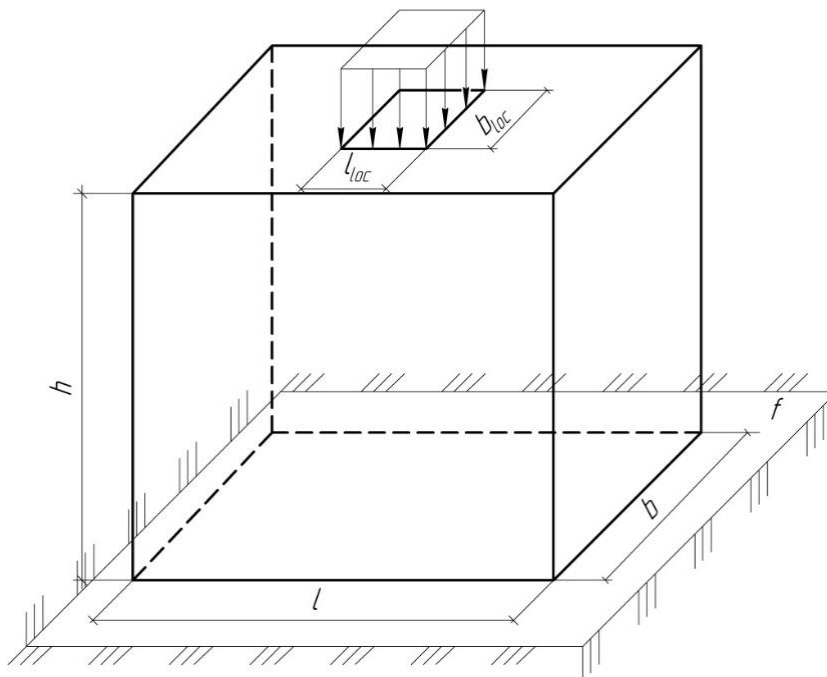


Рис. 1. Бетонний елемент в умовах одностороннього місцевого стиснення

Розрахункові залежності для визначення міцності легкого бетону при дії місцевого стиснення за різними нормами проектування

№ гр.	Нормативний документ	Розрахункова залежність
1	СНиП 2.03-01-84*	$f_{c,loc} = 13,5 f_{cd} \sqrt[3]{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 20 f_{cd}$ $f_{c,loc} = f_{cd} \sqrt[3]{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 2,5 f_{cd} \quad \text{при C20/25 – C32/40;}$ $f_{c,loc} = f_{cd} \sqrt[3]{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 1,5 f_{cd} \quad \text{при класі нижче C8/10}$
2	NS 3473:1994, DIN 4219-2; ACI 318-02; NZ 3101.1; CIRSOC 201; ЕНЕ	$f_{c,loc} = f_{cd} \sqrt[3]{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 2 f_{cd}$ $f_{c,loc} = \varphi 0,85 f_c' \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 2,0 \varphi 0,85 f_c'$ <p style="text-align: right;">, де $\varphi = 0,7$;</p> <p>f_c' – циліндрична або призмова міцність бетону при осьовому стиску (МПа)</p> $f_{c,loc} = f_{cd} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,3 f_{cd}$
3	EN 1992-1-1:2004; ВВК04	$f_{c,loc} = f_{cd} \left\{ \frac{A_{c1}}{A_{c0}} \right\}^{\frac{\rho}{4400}} \leq 3 \left(\frac{\rho}{2200} \right) f_{cd}$ <p>ρ – середня щільність легкого бетону (кг/м³)</p>
	DIN1045-1:2001	$f_{c,loc} = f_{cd} \left\{ \frac{A_{c1}}{A_{c0}} \right\}^{\frac{\rho}{4400}} \leq 3 \left(\frac{\rho}{2200} \right) f_{cd}$

Із аналізу авторських залежностей для визначення міцності бетону при дії місцевого стиснення видно, що між залежностями існують серйозні розбіжності. Згідно¹⁷ причина такої неузгодженості полягає в недостатньо коректній постановці дослідів, коли при вивченні впливу одних факторів не враховувався вплив інших. Всього встановлено як мінімум 8 факторів (див. табл. 1.1). Очевидно, що врахувати всі чинники в емпіричних формулах неможливо.

Методи розрахунку, що діяли в колишньому СРСР та чинних в Україні та нормативних документах з проектування фібробетонних

¹⁷ Мустафин И.И., Соколов Б.С. Экспериментальные исследования бетонных элементов при действии местной нагрузки. Депонир. в ВПИИС, 1986. Вып. 2, № 7487.

конструкцій прийняті за аналогією до методів розрахунку норм проектування армоцементних конструкцій. Крім того, значення коефіцієнтів надійності за матеріалами в цих документах застосовуються відповідно до вимог, що не відповідає європейським нормативним документам. При цьому більш низькі значення коефіцієнтів надійності за матеріалами, можуть привести до зниження надійності та довговічності конструкцій, які проектуються.

Аналіз показав, що розділ 6.5 «Розрахунок сталевібробетонних елементів на місцевий стиск» СП РФ повністю базується на положеннях СП РФ, що регламентують розрахунок залізобетонних конструкцій на місцевий стиск. Однак для розрахунку в¹⁸ використовується розрахункова призмova міцність сталевібробетона на стиск замість призмovoї міцності бетону за¹⁹.

Розділ 6.4 «Розрахунок сталевібробетонних елементів на місцевий стиск» ДСТУ України повністю копіює розділ 6.5 «Розрахунок сталевібробетонних елементів на місцевий стиск» СП РФ.

У Республіці Білорусь в 2013 – 2015 роках розроблено нормативний документ ТКП 45-5.03-300-2015 «Вироби і конструкції з сталевібробетона. Правила проектування», де для місцевого стиснення була використана методика СНБ 5.03.01-02. Однак для більш повного відображення фізичної сутності підвищення міцності вібробетону при місцевому стисненні введено поняття коефіцієнта ψ_c , котрий враховує відносний рівень бічного обтиснення, створюваного оточуючим вібробетоном.

У стандарті Швеції запропоновано доповнити розділ 6.7 EN 1992-1-1 абзацом такого змісту: «Для сприйняття зусиль розтягу, що виникають в результаті дії навантаження, має бути передбачено армування. Фіброве армування розраховується відповідно до розділу 6.5». Тут слід зазначити, що розділ 6.5 регламентує розрахунок за каркасно-стрижневою моделлю.

У рекомендаціях SFRC Consortium, розроблених у Данії, пропозиції стандарту Швеції були деталізовані розрахунковою схемою, що відображає застосування розрахункової каркасно-стрижневої моделі для випадку плоскої задачі. Згідно SFRC Consortium перевірка несучої здатності повинна ґрунтуватися на використанні прямокутної епюри напружень і розрахункової міцності

¹⁸ СП 52-104-2006 «Сталевібробетонные конструкции», М., ГосСтрой России. ГУА НИИЖБ, 2006, 80 с.

¹⁹ СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. Москва. 2004. 59 с.

фібробетону осьовому розтягу, що враховує орієнтацію фібр по відношенню до напрямку зусилля в стержнях.

Міжнародною федерацією бетону FIB розроблений FIB Model Code 2010 в якості основи для подальшого вдосконалення нормативних документів з розрахунку конструкцій із бетону. В FIB Model Code 2010 містяться розділи, присвячені властивостям фібробетона як матеріалу (розділ 5.6) і перевірок несучої здатності й експлуатаційної придатності конструкцій із фібробетона (розділ 7.7). У FIB Model Code 2010 не наведено рекомендацій, які стосуються особливостей розрахунку фібробетонних конструкцій при місцевому стисненні.

Аналіз експериментальних досліджень несучої здатності фібробетонних елементів при місцевому стисненні показав, що такі дослідження проводилися з 1970-х років у різних країнах. При цьому використовувалися різні види дослідних зразків (куби, призми, циліндри), види фібр. Як правило, змінними параметрами являлися об'ємний відсоток армування фіброю і відношення площадки зразка, що навантажується, до площадки прикладання місцевого навантаження. Слід зазначити, що в більшості перерахованих публікацій дані про результати випробувань дослідних зразків наведені в графічному вигляді або в відносних величинах, що не дозволяє з достатньою достовірністю визначити фактичну несучу здатність зразків. Крім того, у багатьох публікаціях відсутні дані про вид контрольних зразків фібробетона і їх міцності на стиск. У зв'язку з відсутністю в доступних джерелах повних даних використовувати результати більшості з перерахованих експериментальних досліджень для подальшого аналізу виявилось неможливим.

3. Теоретичні й експериментальні дослідження міцності при зминанні базальтофібробетонних елементів при центральному односторонньому стисненні

Розрахунок міцності розробленим в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» варіаційним методом у теорії пластичності бетону²⁰ проводиться в такій послідовності:

– приймається кінематично можлива схема руйнування елемента та задаються напрямки руху окремих частин елемента. Контур

²⁰ Kuznietsova, I., Dovzhenko, O., Pohribnyi, V. & Usenko, I. Influence of the sizes and the loading platform form on the strength of concrete elements at local compression, Proceedings of the 2020 Session of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 2020. pp. 63–69.

поверхні руйнування описується геометричними параметрами g_i , а швидкості руху частин елемента позначаються як V_j ;

– на поверхні руйнування S_i знаходяться розриви нормальної ΔV_n та дотичної ΔV_t до S_i складових швидкості, виражені через параметрами g_i, V_j ;

– записується функціонал методу, котрий на дійсному напружено-деформованому стані досягає мінімуму;

– формула граничного навантаження F_u визначається через параметри g_i та відношення швидкостей $k_j = V_j / V_F$, де V_F – швидкість точки прикладання навантаження;

– невідомі параметри g_i і k_j визначаються з умови мінімуму граничного навантаження. Потім розраховується F_u .

Кінематична схема руйнування зразка при односторонньому центральному зминанні квадратними штампами представлена на рис. 2.

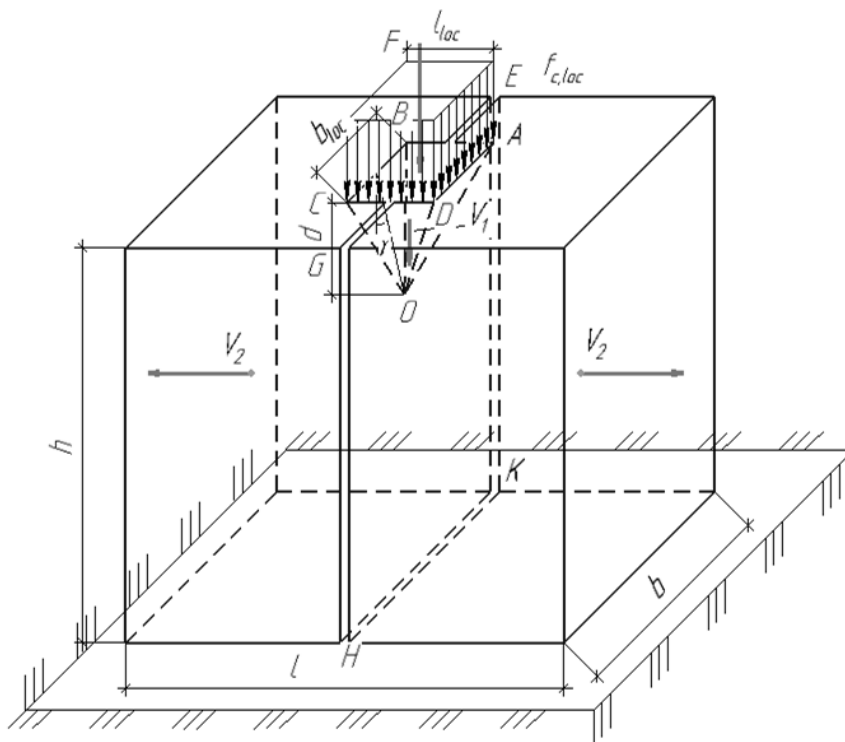


Рис. 2. Кінематична схема руйнування бетонного куба при центральному односторонньому зминанні квадратними штампами

Зразок розділений на три частини: рівносторонню піраміду з основою, що дорівнює площадці навантаження, котра переміщується

вниз зі швидкістю V_1 , та два елементи, виділені площиною розколювання та поверхнею ковзання, що віддаляються в горизонтальній площині одна від одної відповідно зі швидкостями V_2 та $-V_2$. Площина розколювання проходить через центр ваги куба паралельно одній із бічних граней зразка. Напруження, що діють по цій площині, приймаються рівними f_{ctd} . Невідомими даної задачі є граничне навантаження, співвідношення швидкості $k = V_2 / V_1$ та кут нахилу площадки ковзання до вертикалі – γ .

Формула для визначення граничного навантаження ²¹ має вигляд:

$$\frac{f_{c,loc}}{m} = 0,5 \frac{\left[B^2 (k - tg\gamma)^2 + 0,25 (ktg\gamma + 1)^2 \right]}{(k - tg\gamma)tg\gamma} + 0,5 \left[B^2 + 0,25 \frac{1 + k^2 (1 + tg^2\gamma)}{tg^2\gamma} \right] + 0,5 \frac{f_{ctd} k (\alpha_1 \alpha_2 tg\gamma - 1)}{m tg\gamma}, \quad (1)$$

де $B^2 = \left[1 + \chi / (1 - \chi)^2 \right] / 3$, $\chi = f_{ct} / f_{c,prizm}$, $k = V_1 / V_2$, $\alpha_1 = 2h / l_{loc}$, $\alpha_2 = 2b / l_{loc}$.

З метою визначення впливу фібри та відношення розмірів ділянки навантаження на характер утворення тріщин і руйнування, а також на величину граничного навантаження зразків розроблена програма та проведені експериментальні дослідження міцності фібробетону із базальтовою фіброю при місцевому односторонньому центральному стисненні.

Для визначення міцносних характеристик бетону (фібробетону) випробовувалися стандартні куби розмірами $150 \times 150 \times 150$ мм на стиск, призми розмірами $150 \times 150 \times 600$ мм на стиск та розмірами $100 \times 100 \times 800$ мм на розтяг. Випробування зразків виконувалося на гідравлічному пресі ПГ-125 та розривній машині при випробуванні на розтяг в лабораторії кафедри будівельних конструкцій (рис. 3).

Навантаження на зразок за місцевого стиснення передавалося через металеві штампи розмірами $l_{loc} \times b_{loc} = 50 \times 50, 50 \times 100, 50 \times 150$ мм (рис. 4). Довжина площадки завантаження l_{loc} при цьому залишається сталою, але змінюється ширина b_{loc} (від $1/3$ розміру сторони

²¹ Кузнецова І.Г., Довженко О.О., Погрібний В.В. Міцність бетону за місцевого стиснення з урахуванням відношення висоти елемента до розміру ділянки навантаження. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 5. С. 61–67.

поперечного перерізу зразка до смугового навантаження на всю ширину зразка).

Фібробетонні зразки виготовлялися за наступною технологією: в першу чергу у бетономішалку порціями закладався цемент і пісок; потім засипалася необхідна кількість фібри; далі суха суміш ретельно перемішувалася; на заключному етапі додавалася необхідна кількість води із пластифікатором та заповнювач (щебінь).

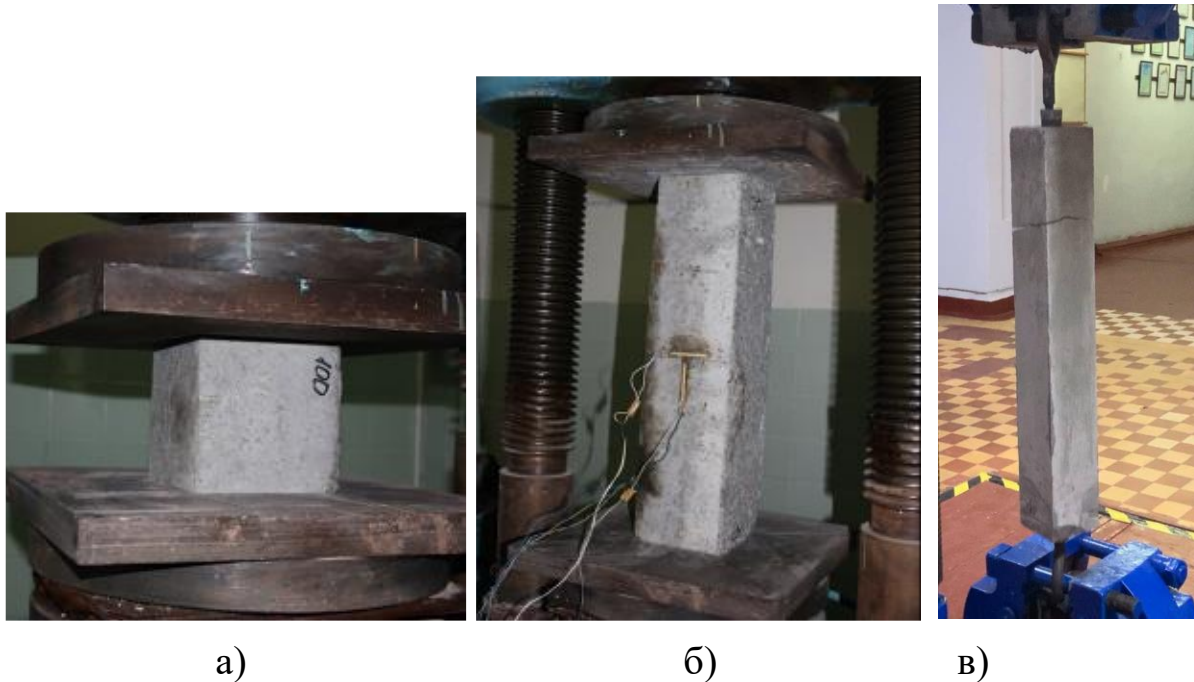


Рис. 3. Випробування стандартних кубів (а) і призм (б) у пресі ПГ-125 для визначення міцносних характеристик бетону на стиск та розтяг (в)

Формування зразків проводилося в металевих і дерев'яних формах із використанням ручного вібратора. Розпалубка відбувалася через 14 діб, протягом яких здійснювався догляд за бетоном. Зразки складовані в закритому приміщенні при температурі 15–18° С і з вологістю 60–70%.

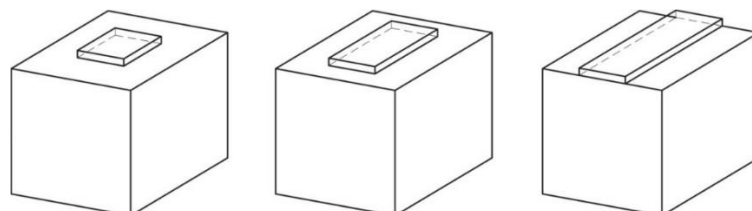


Рис. 4. Схема навантаження кубів розмірами 150×150×150 мм через штампи розмірами $l_{loc} \times b_{loc} = 50 \times 50, 50 \times 100, 50 \times 150$ мм

Виготовлено три серії дослідних зразків, склад бетону для яких представлено в табл. 3.

У якості в'язучого застосовувався портландцемент марки 500, заповнювача – гранітний щебінь Кременчуцького кар'єру і річковий пісок середньої крупності. Також використовувався універсальний та ефективний пластифікатор SikaPlast–2508 і базальтова фібра technobasalt РБР-18-Т10/12 з довжиною волокна 12 мм та діаметром волокна – 18 ± 2 мкм.

Таблиця 3

Склад бетонної суміші для виготовлення зразків

№ замісу	Компоненти на м ³	Кількість
1	Цемент М500, кг	520
	Щебінь крупності 2 – 5 мм, кг	1440
	Пісок, кг	370
	Пластифікатор «Sika-Plast 2508», л	2,5
	Базальтова фібра, кг	16,7
	Вода, л	254
2	Цемент М500, кг	520
	Щебінь крупності 2 – 5 мм 2 – 5, кг	1440
	Пісок, кг	370
	Пластифікатор «Sika-Plast 2508», л	2,38
	Вода, л	240
3	Цемент М500, кг	520
	Щебінь крупності 2 – 5 мм, кг	1440
	Пісок, кг	370
	Вода, л	250

На рис. 5–7 представлені розгортки дослідних зразків, виготовлених із трьох замісів, після випробування на місцеве стиснення штампом розміром $l_{loc} \times b_{loc} = 50 \times 50$ мм.

Рис. 5 ілюструє характер руйнування зразків, виготовлених із важкого бетону. На верхній грані спостерігаємо тріщину, котра окреслює площадку навантаження за контуром і тріщини, котрі проходять паралельно одній із сторін зразка та продовжуються на його двох бічних гранях.

Для елемента із важкого бетону, при виготовленні якого використовувався пластифікатор, характер руйнування представлений на рис. 6. На першому етапі утворювався клин ущільнення під площадкою навантаження, котрий потім розколював тіло елемента. На верхній грані спостерігається система тріщин у двох

взаємно перпендикулярних напрямках, котрі виходять на три бокові грані куба.

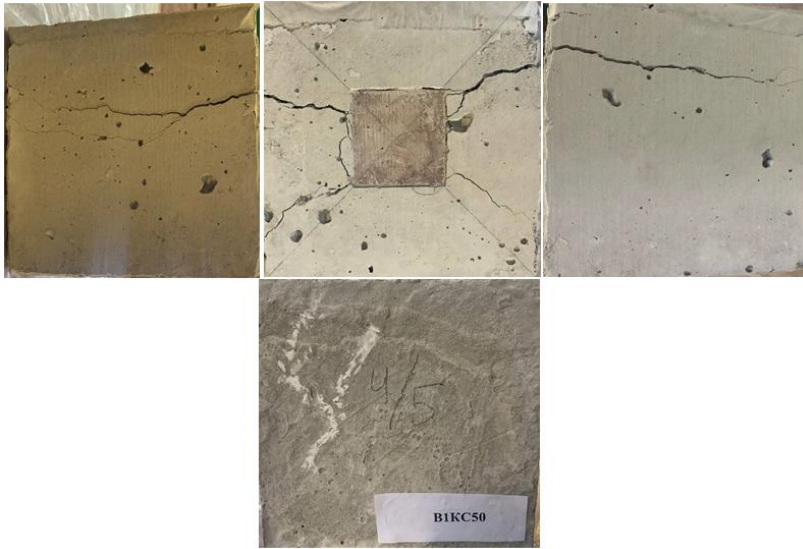


Рис. 5. Розгортка бетонного куба після руйнування при місцевому односторонньому центральному стисненні штампами розміром 50×50

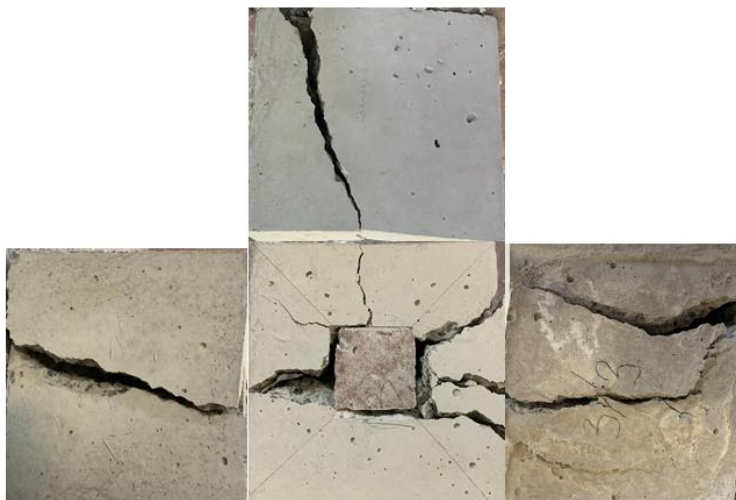


Рис. 6. Розгортка бетонного куба, виготовленого із застосуванням пастифікатора, після руйнування при місцевому стисненні квадратним штампом

При випробуванні фібробетонних елементів реалізувався випадок нерівномірного місцевого стиснення, котрий відображено на рис. 7: клин ущільнення має трикутну основу, котра дорівнює половині площадки навантаження, тріщина розколювання в цьому випадку на верхній грані проходить під кутом до граней куба.



Рис. 7. Руйнування фібробетонного куба при місцевому нерівномірному стисненні квадратним штампом

В перших двох випробуваннях руйнування супроводжувалося утворенням і розвитком тріщин відриву та зсувом за похилими площинами, які з'єднують кути штампа з вертикальною тріщиною. Зазначене руйнування відповідає кінематично можливій схемі, представленої на рис. 2.

У разі нерівномірного впливу навантаження для розроблення формули для визначення руйнівного зусилля потрібно запропонувати іншу кінематично можливу схему.

Експериментальні та теоретичні дослідження продовжуються в межах виконання дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Розширення застосування бетону в будівництві та жорсткість умов, які пред'являються до експлуатації конструкцій, вимагає підвищення його міцності, тріщиностійкості, опору ударним і динамічним впливам. Дисперсне армування й армування безперервною волокнистою арматурою дозволяє розв'язувати поставлені задачі завдяки своїми численним позитивним властивостям.

Згідно експериментальних досліджень оптимальними розмірами базальтової фібри є – довжина 12 мм, діаметр 20 мкм, відсотковий

вміст – 0,2%. При цьому суттєво збільшується межа міцності при згинанні та стисканні порівняно з неармованим зразком.

До факторів, які обумовлюють міцність бетонних елементів при зминанні, в першу чергу слід віднести:

- форму, розміри зразка (штампа), а також їх співвідношення;
- схему та спосіб передачі навантаження;
- вид бетону.

Більшість методів розрахунку базуються на формулі Баушингера й її варіаціях, оперують максимум 2 – 3 значимими факторами, тоді як їх не менше 8. Це призводить до суттєвих розбіжностей дослідних і теоретичних результатів.

Для розрахунку міцності бетону (фібробетону) при місцевому стисненні застосовано варіаційний метод у теорії пластичності бетону

В Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» розроблено варіаційний метод у теорії пластичності для розрахунку міцності бетонних елементів, котрий з нашої точки зору являється перспективним для створення достатньо загальної методики розрахунку міцності фібробетонних елементів на базальтовій фібрі при місцевому стисненні.

Отримані в експериментальних дослідженнях дані про характер руйнування, слугують базою для створення кінематично можливих схем руйнування варіаційного методу в теорії пластичності.

АНОТАЦІЯ

Надійність будівель і споруд із залізобетону у великій мірі залежить від ефективності конструктивних рішень опорних ділянок та вузлів з'єднання елементів несучих систем. При цьому важливе місце відводиться розгляду питань забезпечення їх несучої здатності. Одним із напрямків розв'язання цієї задачі є підвищення характеристик міцності бетону, зокрема шляхом використання базальтової фібри. Запропоновано застосування варіаційного методу у теорії пластичності бетону для розрахунку базальтофібробетонних елементів при місцевому стисненні. Виконані експериментальні дослідження бетонних і фібробетонних кубів при місцевому стисненні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Войлоков И.А., Канаев С.Ф. Базальтофибробетон. Исторический экскурс. *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 4. С. 26–31.

2. Tehrani F.M. Performance of Steel Fiber-reinforced Concrete in Beam-column Connections : a dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Civil Engineering, University of California, Los Angeles, 2008, 413 p.
3. Abbas U. Materials Development of Steel-and Basalt Fiber-Reinforced Concretes. Norwegian University of Science and Technology, 2013, 162 p.
4. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. 3 изд. Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2011.
5. Малышев В.Ф. Особенности технологии изготовления сталефибробетонных трубчатых изделий : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1985. 24 с.
6. Фудзи Т. Механика разрушения композиционных материалов / пер. с яп. Т. Фудзи, М. Дзако. Москва : Мир, 1982. 232 с.
7. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Семкова Е.Н. Щелочестойкость базальтового волокна и способы ее повышения. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2012. № 1. С. 185–192.
8. Боровских И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Казань, 2009. 20 с.
9. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони / Дворкін Л.Й. та ін.: монографія. Рівне : НУВГП, 2017.
10. Кудяков К.Л., Невский А.В., Ушакова А.С. Влияние дисперсного армирования базальтовым волокном на прочностные свойства бетона : X Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (23.04-26.04.2013). Томский госуд. Архитект.-строит. Университет. Томск, 2013. С. 708–710.
11. Новицкий А.Г., Ефремов М.В. Аспекты применения базальтовой фибры для армирования бетонов. *Науково-технічний збірник «Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка»*. Київ. 2010. Вип. 36. С. 22–26.
12. Васильовская Н.Г., Енджиевской И.Г., Калугин И.Г. Цементные композиции дисперсно-армированные базальтовой фиброй. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. Томск, 2011. Вип. 3. С. 153–158.

13. Roberts-Wolimann C.L., Banta T., Bonetti R. and Charney F. «Bearing Strength of Light-Weight Concrete.» *ACI Materials Journal*. 2006. 103 (6), pp. 459–66.

14. Venckevicius V. 2005. «About the Calculation of Concrete Elements Subjected to Local Compression.» *Journal of Civil Engineering and Management*, 11 (3). 2005. pp. 243–48. Accessed September doi:10.3846/13923730.2005.9636355.

15. Rak N.A. «Metodyka Rascheta Soprotivleniya Stalefybробетонnykh Elementov Mestnomu Szhatyiu.» *Vestnyk Polotskoho Hosudarstvennoho Unyversyteta. Stroytelstvo. Prykladnye Nauky. Stroytelnye Konstruktsyy*. 2017. № 16, pp. 93–97.

16. Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads / R. Breitenbücher et al.. *Proceedings of Joint ACI-fib International Workshop : Fibre Reinforced Concrete : from Design to Structural Applications (FRC 2014)*. pp. 431–443.

17. Мустафин И.И., Соколов Б.С. Экспериментальные исследования бетонных элементов при действии местной нагрузки. Депонир. в ВПИИС, 1986. Вып. 2, № 7487.

18. СП 52-104-2006 «Сталефибробетонные конструкции», М., ГосСтрой России. ГУА НИИЖБ, 2006, 80 с.

19. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. Москва : 2004. 59 с.

20. Influence of the sizes and the loading platform form on the strength of concrete elements at local compression / Kuznietsova I., Dovzhenko O., Pohribnyi V. & Usenko I.. *Proceedings of the 2020 Session of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, 2020. pp. 63–69.

21. Кузнєцова І.Г., Довженко О.О., Погрібний В.В. Міцність бетону за місцевого стиснення з урахуванням відношення висоти елемента до розміру ділянки навантаження. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 5. С. 61–67.

Information about the author:

Kuznietsova Iryna Hryhorivna,

Postgraduate Student at the Department of Building Structures
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»
24, Pershotravnevyy Avenue, Poltava, 36011, Ukraine