

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ЯКОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ЗАХИСНИХ СПОРУД В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Афанасьева Л. В.¹, Лавріненко Л. І.²

*Київський національний університет будівництва та архітектури
03680, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31*

E-mail: ¹afanasieva2709@gmail.com, ²ludmila.lavrinenko@gmail.com

Конструктивні елементи захисних споруд як бар'єри покликані сприймати динамічні навантаження, до яких відноситься і високошвидкісний удар. Загальну просторову жорсткість будівлі визначає характер локального руйнування окремих її конструкцій, тобто глибиною проникнення ударника в їх тіл внаслідок дії ударного навантаження. Накопичений досвід чисельного моделювання процесів удару по різним мішеням. При цьому діапазон зміни деформацій захисних залізобетонних конструкцій в момент пробивання їх , а також визначення динамічного характеру деформування потребують всебічного обґрунтування.

Будівництво захисних споруд в Україні здійснюється відповідно до вимог державних нормативних документів [1]. Аналізу фізичних явищ високошвидкісної взаємодії елементів системи – конструкції («плита») і пробійника («ударник») присвячені роботи [2–8]. Швидкість зіткнення впливає на зміну структури речовин тіл, порушує симетрію кристалічної решітки матеріалів. До факторів, що впливають на процес взаємодії ударника й плити в проведених дослідженнях включені початкова швидкість ударника і кут зустрічі ударника з плитою.

Метою проведених досліджень [9–11] є висвітлення результатів розрахунку і моделювання взаємодії ударника і плити, а також аналіз їх поведінки і характер руйнування при динамічному навантаженні, що спричинено дією високошвидкісного удару.

В проведених дослідженнях застосований програмний комплекс ANSYS, який реалізує систему математичних рівнянь, що описують рух і стан системи «ударник–плита» при їх взаємодії [9].

Головні параметри, що визначаються за результатами розрахунку:

- напружено-деформований стан ударника і плити при їх взаємодії;
- зміна шляху (глибина проникнення ударника в плиту), швидкість і прискорення ударника в залежності від часу;
- залишкова швидкість після пробиття плити.

Проведені дослідження [2] свідчать, що для металів і сплавів, а також для бетону високошвидкісний діапазон дії навантаження відповідає умові:

$$M_0 = v_0 / c_0 < 0,75, \quad (1)$$

де v_0 – швидкість удару; c_0 – швидкість звуку в матеріалі.

Дослідження високошвидкісної взаємодії тіл передбачають визначення:

- швидкості і траєкторії ударника до зіткнення з плитою;
- характеру деформування ударника і плити при їх взаємодії;
- параметрів кратера в плиті;
- залишкової швидкості і маси ударника після пробиття плити;
- граничної швидкості пробиття;
- маси, швидкості великих осколків, що утворюються в процесі зіткнення і т.ін.

Розрахунок параметрів проникнення ударника в плиту, а також межі наскрізного пробиття наведені в роботах [5, 6].

Слід зазначити, що при динамічному навантаженні зміна швидкості деформацій стиску або розтягу призводить к суттєвим змінам фізико-механічних характеристик матеріалів. Дослідні випробування показали, що при зростанні швидкості деформацій відбувається збільшення міцності матеріалу.

Головним критерієм, який характеризує міцність матеріалу плити при динамічному навантаженні є коефіцієнт динамічного зміцнення, що визначається як відношення міцності бетону дослідних плит при динамічному і статичному навантаженні. В проведених дослідженнях чисельне моделювання взаємодії ударника і плити виконане з застосуванням пружно-пластичної моделі, що реалізована засобами ПК ANSYS з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) [12]. Модель реалізує можливість визначення поверхонь міцності – залишкової, руйнування, а також межі пластичності [14, 15]. При навантаженні поточна поверхня міцності мігрує між трьома зазначеними поверхнями. Моделювання дії високошвидкісного удару досягається сумісним деформуванням матеріалів ударника і плити з матеріалом середовища [14].

Використання моделей твердих тіл, яким властивий пружно-пластичний характер роботи при взаємодії, дозволяє враховувати вплив швидкості деформацій на межу текучості матеріалу.

Наведені передумови чисельного моделювання використані в процесі досліджень роботи залізобетонних плит під дією високошвидкісного удару [15, 16]. За результатами виконаних досліджень

розроблені розрахункові моделі дослідних плит, встановлені особливості проникнення ударника в плити з різними типами армування.

Чисельному моделюванню піддавались плити, конструктивне рішення яких передбачає армування: подвійними сітками, подвійними сітками з поперечною арматурою, суцільним металевим листом, арматурними сітками і фібрами. Особливості проникнення ударника в плити, що армовані одинарними і подвійними сітками, унеможливають їх використання в захисних спорудах внаслідок наскрізного пробиття плити ударником. Використання суцільного металевих листа потребує додаткових технологічних рішень внаслідок розширення плити вздовж листа.

Проведені чисельні дослідження [9–11] свідчать, що дослідні плити з використанням комбінованого армування – сітчастого і дисперсною фіброю – не пробиваються ударником, частина зразка залишається неушкодженою.

Це досягається рядом переваг дисперсного зміцнення конструкції – збільшує міцність на розтяг; знижує крихкість бетону; підвищує його в'язкість, що сприяє збільшенню тріщиностійкості елемента в цілому. Таким чином, поєднання дискретного традиційного армування конструкції з дисперсним сприяє підвищенню їх експлуатаційних якостей під дією зовнішніх впливів.

Характеристики дослідних зразків з комбінованим армуванням:

– ударник: циліндрична форма діаметром – 23 мм; довжина – 65 мм; початкова швидкість ударника – 800 м/с; гексаedr розміром 4 мм; кількість елементів – 425; кут зустрічі – 0°; густина матеріалу – 7750 кг/м³; межа текучості – 1539 МПа; температура плавлення – 1489,9 °С; модуль зсуву – 81,8 ГПа;

Плита: товщина – 400 мм; матеріал – бетон класу С35; гексаedr розміром 4мм; кількість елементів – 1834326. Залишок неушкодженої частини становить 44,0 мм.

Результати чисельного експерименту свідчать, що дисперсне армування фібрами, рівномірно розподіленими в цементній матриці, зумовлює гальмування розвитку тріщиноутворення при дії ударних навантажень; це унеможливило виникнення наскрізного руйнування елемента.

Встановлений характер руйнування дослідних елементів на підставі отриманих значень остаточної швидкості ударника. Величина останньої до 35,0 % менше в комбіновано армованих плитах.

За даними досліджень [11] встановлено, що дисперсне зміцнення надміцного бетону сталюю фіброю сприяло зменшенню оста-

точної швидкості ударника до 52,0 %, при цьому глибина проникнення ударника зменшилась до 38,0 %.

Характер проникнення ударника в комбіновано армовану плиту наведений на рис. 1.



Рис. 1. Особливості проникнення ударника в плиту з комбінованим армуванням

Таким чином, армування дисперсною фіброю, рівномірно розподіленою в цементній матриці, зумовлює гальмування розвитку тріщиноутворення при дії ударних навантажень, запобігає миттєвому крихкому руйнуванню конструкції внаслідок наскрізного пробиття ударником. Наприклад, підсилення залізобетонних плит вуглепластиком сприяло зменшенню остаточної швидкості ударника до 18,0 % [16].

Враховуючи, що використовувані бетони в проведених дослідженнях охоплюють вузький спектр міцності на стиск, доцільно провести подальші дослідження роботи залізобетонних конструкцій з використанням нанотехнологічних підходів. Особливої уваги потребує питання рухливості бетонної суміші з урахуванням наявної кількості арматурних елементів, що спричиняє зниження її рухливості.

На підставі викладених результатів чисельних досліджень роботи елементів з комбінованим армуванням їх обґрунтовано можна рекомендувати до застосування в практику будівництва захисних споруд, що відповідають умовам експлуатації при дії високошвидкісного удару. Потребують подальшого розвитку дослідження технологічних бетонів для можливого їх використання в конструкціях-бар'єрах захисних споруд, що здатні витримувати динамічні впливи в умовах високошвидкісного удару.

Література

1. ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту». – Київ : Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. – 112 с. – Чинний з 01.11.2013.
2. Ковтун А. В. Моделі взаємодії високошвидкісного ударника з захисними перешкодами / А. В. Ковтун, В. О. Табуненко, С. І. / Нестеренко // Опір матеріалів і теорія споруд = Strength of Materials and Theory of Structures. – 2019. – № 102. – С. 207–219.
3. M. Esaker, G. Thermou, L. Neves. Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review // International Journal of Impact Engineering, 2023. – 180 (11). – Pp. 2–22.
4. M. Esaker, G. Thermou, L. Neves. Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review // International Journal of Impact Engineering, 2023. – 180 (11). – Pp. 2–22.
5. Noël, K. Soudki. Estimation of the crack width and deformation of FRP-reinforced concrete flexural members with and without transverse shear reinforcement // Journal Engineering Structures, 2014. – 59 (2). – Pp. 392–398.
6. A. Dancygier, A. Katz, D. Benamou, D. Yankelevsky. Resistance of double-layer reinforced HPC barriers to projectile impact // International Journal of Impact Engineering, 2014. – 67 (5). – Pp. 39–51.
7. Noël, K. Soudki. Estimation of the crack width and deformation of FRP-reinforced concrete flexural members with and without transverse shear reinforcement // Journal Engineering Structures, 2014. – 59 (2). – Pp. 392–398.
8. T. Teng, Y. Chu, F. Chang, B. Shen, D. Cheng. Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact // Journal Computational Materials Science, 2008. – 42 (3). – Pp. 90–99.
9. Афанасьєва Л. В. Залізобетонні конструкції в умовах високошвидкісного удару // Містобудування і територіальне планування, 2016, Вип. 61. – С. 108–113.
10. Афанасьєва Л. В. Про можливість використання залізобетонних конструкцій в умовах дії високошвидкісного удару // Збірник праць XIII Міжнародної наукової конференція «Наука і освіта, Угорщина, Хайдусобосло, 2019. – С. 3–7.
11. Афанасьєва Л. В., Лаврінєнко Л. І. Конструкції захисних споруд в умовах високошвидкісного удару. Містобудування та територіальне планування : зб наук. пр. – Київ : КНУБА, 2024. – Вип. 86. – С. 230–242.

12. Петрученко О. С. Динамічні та кінематичні характеристики етапу проникнення кулі в броню / Петрученко О. С., Флюд О. В., Величко Л. Д. // Військово-технічний збірник. – 2017. – № 16. – С. 8–11.
13. Клованич С. Ф. Метод скінчених елементів в нелінійних задачах інженерної механіки / С. Ф. Клованич // Запоріжжя. – Світ геотехніки, 2009. – 400 с.
14. Барабаш М. С. Комп'ютерне моделювання процесів життєвого циклу об'єктів будівництва / М. С. Барабаш // Сталь, 2014. – 301 с.
15. Моделювання динамічних навантажень вибухового типу в задачах дослідження міцності будівельних конструкцій з використанням ПК ЛІРА-САПР / Максименко В., Барабаш М., Костира Н., Бармін І. // Наука та будівництво. – 2023. – 38 (4).
16. W. Sun, W. Zhang, J. Yuan, X. Gao, Y. Wua, W. Ni, J. Feng. Multi-scale study on penetration performance of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete // Journal Construction and Building materials, 2024. – 422 (4).