

ВЛАСТИВОСТІ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ БЕТОНІВ З КОМПЛЕКСНОЮ ДОБАВКОЮ-МОДИФІКАТОРОМ

PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETES WITH A COMPLEX ADDITIVE-MODIFIER

Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Макаренко Р.М., к.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-4839-9623, Бордюженко О.М., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-3686-5121 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Dvorkin Leonid, doctor of technical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Makarenko Ruslan, Ph.D., professor, ORCID: 0000-0003-4839-9623, Bordiuzhenko Oleh, Ph.D., associate professor, ORCID: 0000-0003-3686-5121 (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

Досліджено вплив комплексної добавки-модифікатора на властивості самоущільнювальних дрібнозернистих бетонів на основі золи та цементу. Встановлено, що оптимальне співвідношення суперпластифікатора й полівінілацетатної дисперсії підвищує міцність, знижує водопоглинання та стиранність, покращуючи довговічність бетону.

The study investigates the influence of a complex modifying admixture (CMA) containing the superplasticizer Melflux and polyvinyl acetate dispersion on the properties of self-compacting fine-grained concretes based on fly ash and cement. The aim was to determine the optimal CMA composition for achieving balanced compressive strength, flexural strength, water absorption, and abrasion resistance. Experiments were carried out using a three-level, three-factor B3 design with variation of the water-to-binder ratio and CMA component contents. The results show that the water-to-binder ratio is the dominant factor affecting strength: increasing W/B significantly reduces compressive strength, while the effect on flexural strength is less pronounced. Increasing the Melflux content at constant W/B enhances strength, whereas excess polyvinyl acetate reduces it. With higher polymer content, the $f_{cm}/f_{ct,f}$ ratio decreases due to adsorption-based modification of the cement matrix structure. Water absorption correlates well with compressive strength and decreases as the Melflux content increases, reaching minimum values when only the superplasticizer is used. A significant reduction in abrasion was also observed in concretes containing PVAD, even at low polymer-cement ratios. The results confirm the effectiveness of complex polymer–mineral admixtures in improving the durability and crack resistance of self-compacting concretes.

Ключові слова: Самоущільнювальний бетон, зола-винос, суперпластифікатор, полівінілацетатна дисперсія, міцність, стиранність. Self-compacting concrete, fly ash, superplasticizer; polyvinyl acetate dispersion, strength, abrasion resistance.

Вступ. Аналіз досліджень. Недостатньо висока деформативність бетону та, особливо, його невисока міцність на розтяг є основними причинами недостатньої тріщиностійкості матеріалу. Використання полімерних добавок у цементних системах сприяє підвищенню міцності цементних бетонів і розчинів на розтяг, а також покращенню їх деформативних властивостей [1-8].

Дослідження показали [1], що додавання 10% полівінілацетатної дисперсії (ПВАД) збільшує міцність на згин цементно-піщаного розчину (1:3) у 3...4 рази при комбінованому твердінні та у 2,9 рази при твердінні на повітрі. Додавання латексу та водорозчинних смол також покращує міцність на згин та співвідношення міцності на стиск до міцності на розтяг [8]. Для цементних бетонів і розчинів, що використовуються в підлогах, полімерні домішки підвищують ударну міцність, адгезію та зносостійкість [9, 10]. За даними Брокарда [11], бетони, що містять ПВАД і тверділі при вологості 50% і полімерцементному відношенні (П/Ц) 0,05, мають втричі вищу стійкість до стирання порівняно зі звичайним бетоном, а при П/Ц = 0,1...0,2 вона збільшується в 12...20 разів.

Полімерні добавки зменшують проникність, покращуючи структуру пор цементного каменю, що призводить до підвищення хімічної стійкості [12]. Заповнення пор полімерами та захопленням повітрям підвищує морозостійкість. Охама [13] виявив, що модифіковані розчини залишалися неушкодженими після 10 років впливу, на відміну від немодифікованих. Модифіковані розчини також стійкі до карбонізації, що запобігає корозії арматури [2].

При низьких співвідношеннях вододисперсні полімери діють як пластифікатори та повітрявтягуючі агенти [10], підвищуючи водоутримуючу здатність та однорідність [13, 14]. Навіть невеликі кількості полімерів (2...3 %) зменшують мікродфекти та покращують структуру бетону.

В останні роки самоущільнювальні бетони набули популярності, особливо для тонкостінних або самовирівнювальних виробів та конструкцій. Поліфункціональні модифікатори, що поєднують суперпластифікатори та полімери, ефективно підвищують пластичність, оброблюваність та тріщиностійкість. Однак вплив полімерних домішок на самоущільнювальні бетони на основі золи та цементу залишається недостатньо вивченим.

Метою цього дослідження було вивчення властивостей самоущільнювальних дрібнозернистих сумішей та бетонів на основі золи-виносу та цементу з використанням комплексної добавки-модифікатору (КДМ).

Матеріали та методи досліджень. В дослідженнях використовували портландцемент підприємства «Волинь-цемент» філія ПАТ «ВІПЦЕМ» СЕМ І 42.5 R, з нормальною густиною 26,8%, золу-виносу Ладиженської ТЕС з питомою поверхнею 3100 см²/г і суміш кварцового піску двох фракцій 0,16...2 мм та 2...5 мм у співвідношенні 0,8:0,2 з модулем крупності 2,15 та водопотребою 8,5%. Витрата в'язучого (суміш цементу і золи у співвідношенні 0,7:0,3) складала 575 кг/м³.

Як компонент КДМ використовували полівінілацетатну дисперсію (ПВАД) – водну емульсію термопластичного полярного полімеру ПВА. Композиція суперпластифікатор (СП) – ПВАД вводилась у бетонну суміш з водою затворення. В якості суперпластифікатора використовували добавку полікарбоксилатного типу Melflux 2651f.

Витрату води доводили до значення розпливу дрібнозернистої бетонної суміші 550...600 мм (клас SF1 за EN 12350-8). При такому розпливі, як показали попередні досліди, осадка стандартного конуса складає 26...27 см.

Для вивчення фізико-механічних властивостей самоущільнювального бетону були виготовлені зразки призми розміром 4×4×16 см (для визначення міцності на стиск та міцності на згин та водопоглинання), а також кубічні зразки з розміром ребра 7,07 см для визначення стираності бетону. Зразки тверділи у повітряно-вологих умовах при температурі 20±2°C. Випробування зразків проводили у віці 7, 28 і 90 діб.

Для розрахунку складу бетону в кожній точці матриці приймали певний об'єм бетонної суміші, що відповідав об'єму замісу. Згідно умов планування експерименту знаходили об'єм заповнювача та в'язучого. Відповідно до прийнятого золо-цементного відношення знаходили об'єм цементу і золи. Витрату компонентів на 1 м³ бетонної суміші знаходили з врахуванням їх густини.

Експериментальні результати та їх аналіз. Технологічні властивості сумішей визначали в попередніх дослідженнях [15]. Зокрема, було встановлено можливість модифікування самоущільнювальних дрібнозернистих бетонних сумішей полімерними добавками, що дозволяє покращити їх технічні властивості такі як, водопотреба, водовідділення та повітрявтягування.

Для вивчення впливу вмісту і складу КДМ на зазначені вище властивості дрібнозернистих бетонів, були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до трьохрівневого трьохфакторного плану В₃ [16]. Умови планування експериментів наведені у табл. 1. Вихідними параметрами були міцність при стиску (f_{cm}) та згині (f_{32}), а також стираність (St) і водопоглинання (W) дрібнозернистого самоущільнюваного бетону (СУБ) в 28-ми добовому віці. Витрата в'язучого складала 575 кг/м³. Співвідношення дрібного заповнювача і в'язучого у дослідіх прийняте $n = 2,5$.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

№ з/п	Фактори	Кодоване значення	Рівні варіювання		
			-1	0	+1
1	Вміст КДМ, % від маси в'язучого	X_1	0,5	1,75	3
2	Масова частка СП у складі КДМ	X_2	0	0,5	1,0
3	Водо-в'язуче відношення	X_3	0,3	0,4	0,5

У результаті статистичного опрацювання отримані рівняння регресії (математичні моделі) показників властивостей СУБ у 28-добовому віці, що є адекватними при 95%-й довірчій ймовірності та приведені в кодованих змінних у табл. 2.

Таблиця 2

Рівняння регресії властивостей СУБ з КДМ

№ з/п	Вихідний параметр	Рівняння регресії
1	Границя міцності при стиску, МПа	$f_{cm} = 62.56 + 1.75X_1 + 6.12X_2 - 20.06X_3 - 1.946X_1^2 - 1.85X_2^2 + 5.2X_3^2 + 6.72X_1X_2 - 1.51X_1X_3$ (1)
2	Границя міцності при згині, МПа	$f_{32} = 7.8 + 0.4X_1 - 0.23X_2 - 0.95X_3 + 0.09X_1^2 - 0.88X_2^2 - 0.44X_3^2 + 0.472X_1X_2$ (2)
3	Водопоглинання, %	$W = 6.64 - 0.21X_1 - 0.57X_2 + 2.47X_3 + 0.15X_1^2 + 0.10X_2^2 - 0.20X_3^2 - 0.29X_1X_2$ (3)
4	Стираність, г/см ²	$St = 0.49 - 0.09X_1 + 0.08X_2 + 0.15X_3 + 0.06X_1^2 + 0.03X_2^2 + 0.04X_3^2 + 0.05X_1X_2 + 0.04X_2X_3$ (4)

Для міцності СУБ при стиску і згині (рис. 1, 2), як і слід було очікувати, із досліджуваних факторів найбільш значимим виявилось водо-в'язуче відношення (X_3). При цьому характерно, що для бетонів із КДМ, так як і для звичайних цементно-піщаних розчинів [17], збільшення В/Ц веде до значно більш істотного падіння міцності при стиску ніж міцності на розтяг при згині.

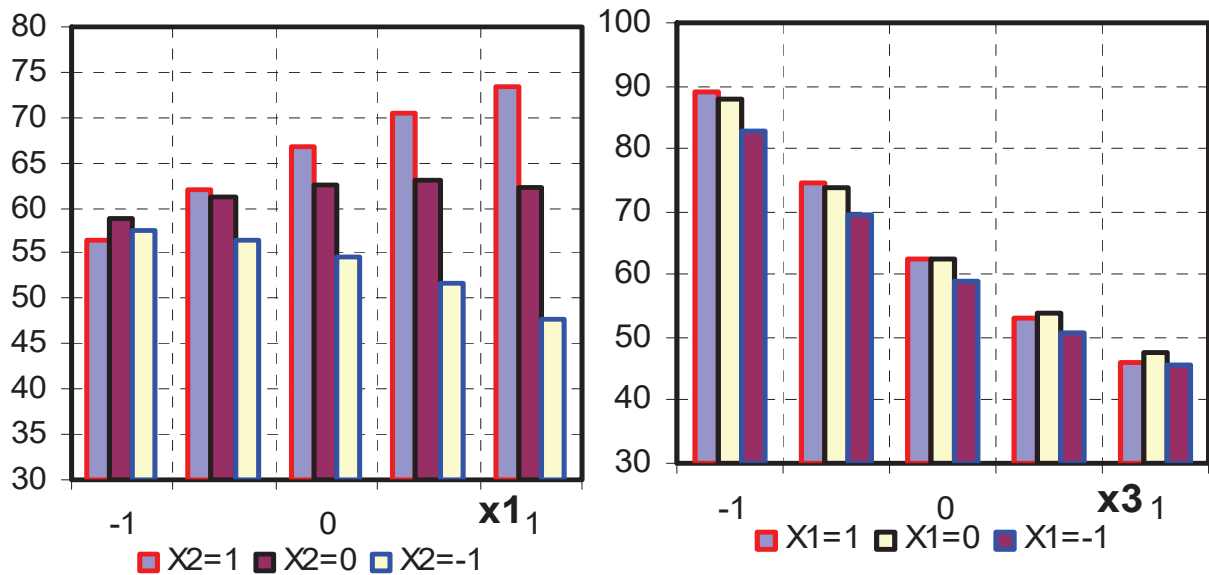


Рис. 1. Залежності міцності при стиску (МПа) самоущільнюваних бетонів із КДМ від досліджуваних факторів (в кодованому вигляді):
вмісту КДМ, % від маси цементу (x_1); масової частки СП у складі КДМ (x_2); В/Ц (x_3)

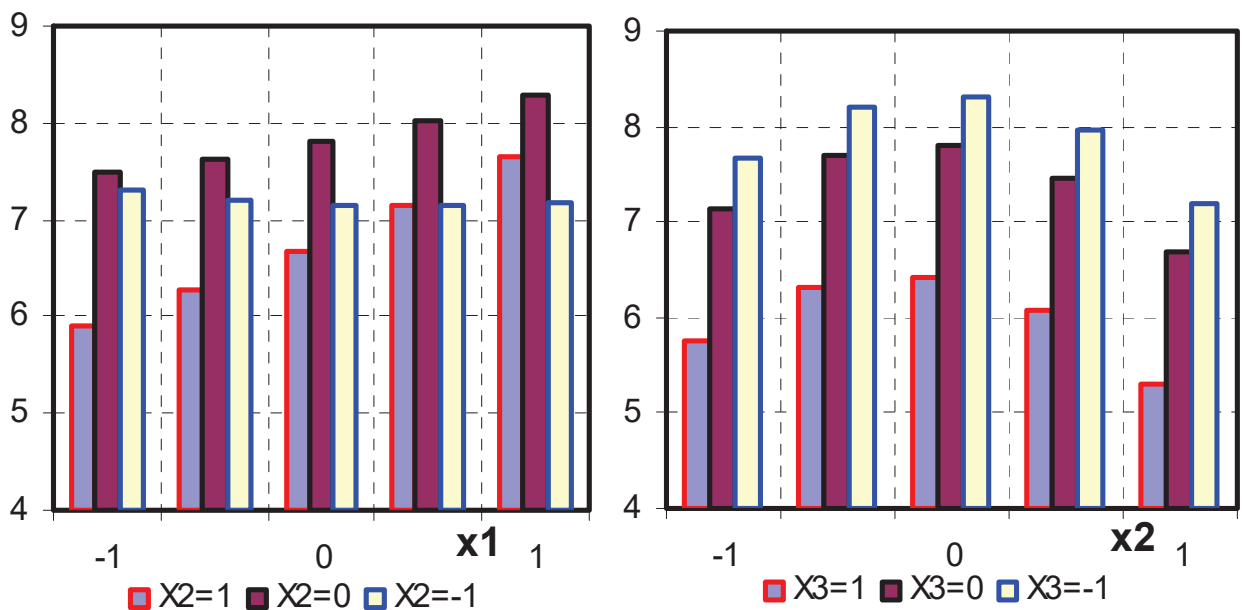


Рис. 2. Залежності міцності при згині (МПа) самоущільнюваних бетонів із КДМ від досліджуваних факторів (в кодованому вигляді):
вмісту КДМ, % від маси цементу (x_1); масової частки СП у складі КДМ (x_2); В/Ц (x_3)

Збільшення вмісту КДМ (x_1) при В/Ц = const може сприяти або збільшенню, або зменшенню міцності на стиск СУБ в залежності від складу комплексної добавки. У тому випадку, коли КДМ представлений тільки

суперпластифікатором Melflux, збільшення його вмісту при постійному В/Ц призводить до суттєвого підвищення міцності.

Інший характер впливу на міцність при стиску другого компонента КДМ – полівінілацетатної добавки. В обраній області варіювання збільшення її вмісту, особливо від 1,5 до 3%, призводить до істотного падіння величини f_{cm} (рис. 1).

Вплив досліджуваної КДМ на міцність СУБ при згині (рис. 2) має ряд особливостей. Найбільше інтенсивно f_{32} у досліджуваній області дозувань КДМ росте в тих випадках, коли добавка представлена лише суперпластифікатором Melflux. Проте абсолютні значення міцності на згин залишаються більш високими при використанні КДМ із максимальною масовою часткою СП не більше 0.5 (рис. 2). Отримані дані показують, що в області порівняно невисоких досліджуваних концентрацій ПВАД відчувається її помітний позитивний вплив на f_{32} самоущільнюваних бетонів. Як відомо [6], цей вплив зростає в області високих концентрацій полімерних добавок. Відповідно знижується і співвідношення f_{cm} / f_{32} . Розрахункові співвідношення f_{cm} / f_{32} для СУБ із КДМ при різних значеннях досліджуваних факторів, отримані з використанням відповідних рівнянь регресії, наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Розрахункові співвідношення f_{cm} / f_{32} для СУБ із добавкою КДМ

№ з/п	Відношення натуральних значень факторів до кодованих			Відношення міцностей f_{ct} / f_{32}		
	$\tilde{X}_1 / X_1$	$\tilde{X}_2 / X_2$	$\tilde{X}_3 / X_3$			
				7 діб	28 діб	90 діб
1	3 / +1	1 / +1	0,5 / +1	5.82	6.57	7.13
2	3 / +1	0 / -1	0,5 / +1	3.51	4.9	4.8
3	0,5 / -1	1 / +1	0,5 / +1	5.69	6.86	7.61
4	0,5 / -1	0 / -1	0,5 / +1	4.31	5.52	5.4
5	3 / +1	1 / +1	0,3 / -1	8.77	9.11	9.26
6	3 / +1	0 / -1	0,3 / -1	6.69	6.98	6.49
7	0,5 / -1	1 / +1	0,3 / -1	9.83	9.37	9.56
8	0,5 / -1	0 / -1	0,3 / -1	7.83	8.61	7.58

Аналіз даних табл. 3 показує, що тенденція до зниження f_{cm} / f_{32} проявляється в міру зростання як загального вмісту КДМ, так і збільшення в останньому частки полімерного компоненту. Можна припустити, що більш низькі відношення f_{ct} / f_{32} СУБ із КДМ обумовлені адсорбційним модифікуванням структури цементного каменю. Відомо [18-19], що адсорбційною здатністю стосовно полярних поверхонь гідратних новоутворень володіють як СП, так і полівінілацетатний полімер. Останній при достатній кількості утворює, крім того, суцільну плівкову матрицю, що також сприяє підвищеній міцності цементного каменю на розтяг і згин [19].

Для бетону без добавок і з пониженим вмістом КДМ, особливо при переважанні СП, характерна тенденція до збільшення f_{cm} / f_{32} із переходом бетону від раннього до більш пізнього віку. При рості вмісту КДМ і частки в ньому полімерного компонента співвідношення міцнісних параметрів стабілізується в часі, або навіть може спостерігатися тенденція до зниження f_{cm} / f_{32} .

Зміна водопоглинання СУБ із КДМ по мірі зміни їхнього складу (рис. 3) добре корелюється з міцністю при стиску, що природно пояснюється близькою залежністю обох властивостей від відкритої пористості бетону. Із збільшенням В/Ц від 0,3 до 0,5 водопоглинання зменшується практично лінійно. При цьому найменше водопоглинання має бетон, що містить у якості добавки тільки суперпластифікатор. Збільшення вмісту СП у бетоні від 0,5 до 3% при В/Ц = 0,4 ($X_3 = 0$) дозволяє зменшити водопоглинання з 8 до 6,5%, тобто на 18,7%.

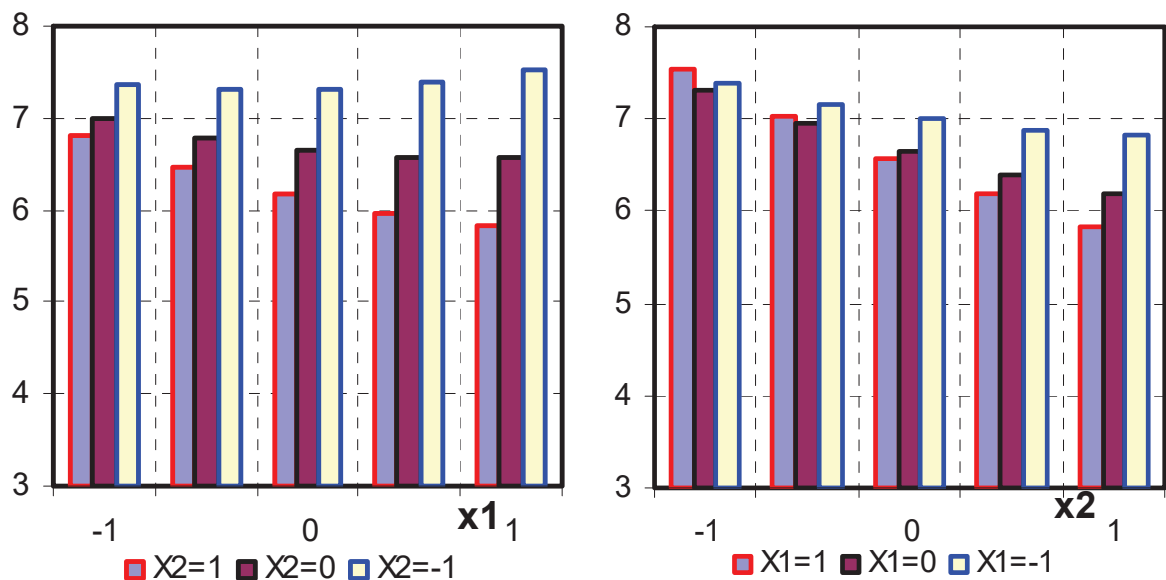


Рис. 3. Залежності водопоглинання (%) самоущільнюваних бетонів із КДМ від досліджуваних факторів

Одним із найбільш істотних переваг полімерцементних бетонів при використанні їх для підлог є їх знижена стиранність. Як показали наші дослідження (рис. 4), істотний позитивний ефект ПВАД на стиранність виявляється і при низьких значеннях полімерцементного відношення (П/Ц). При П/Ц = 0,005 і В/Ц = 0,3 розрахункова стиранність СУБ складає 0,53 г/см², у той час як зростання П/Ц до 0,03 зменшує стиранність до 0,35 г/см², тобто на 34%. Додаткові дослідження показали, що стиранність СУБ без добавок склала 0,83 г/см².

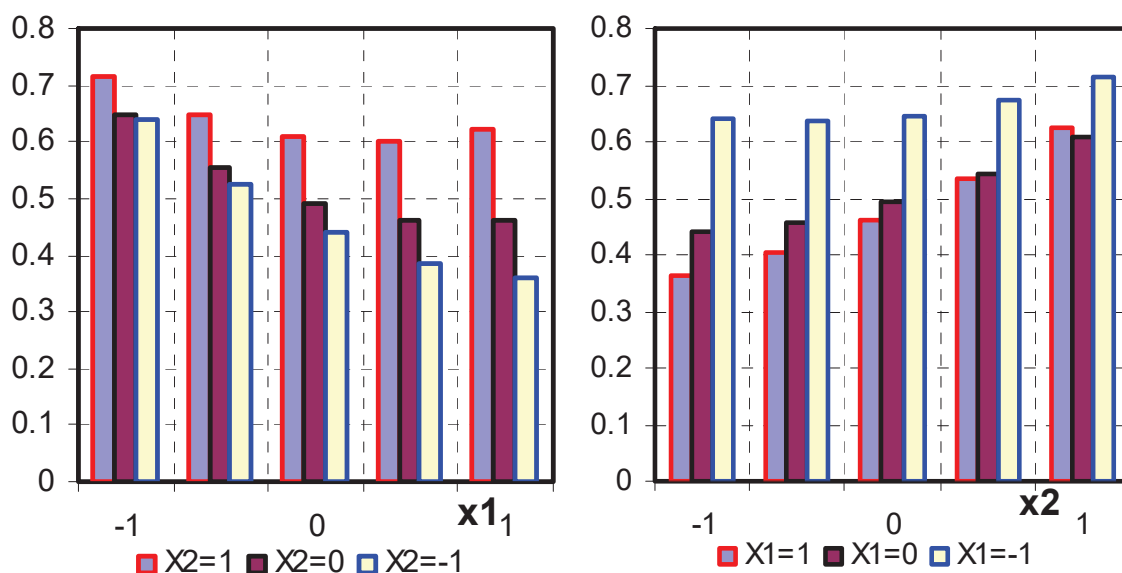


Рис. 4. Залежності стираності (г/см^2) самоущільнюваних бетонів із КДМ від досліджуваних факторів

Аналіз отриманого комплексу рівнянь регресії показує, що сумарний вплив компонентів досліджуваних КДМ є, як правило, адитивним. Вибір складу КДМ має визначатися як нормованими властивостями бетону, так і техніко-економічними міркуваннями.

Висновки

1. Встановлено можливість модифікування самоущільнювальних дрібнозернистих бетонних сумішей полімерними добавками, що дозволяє покращити їх технічні властивості.
2. Комплексна добавка-модифікатор (КДМ), що включає полікарбоксилатний суперпластифікатор Melflux 2651f і полівінілацетатну дисперсію дозволяє зменшити водопотребу самоущільнювальних бетонів на 13...19%.
3. Використання КДМ забезпечує зниження водовідділення бетонної суміші, сприяє збереженню рухомості в часі.

1. D.O. Baydjanov, K.A. Abdrakhmanova, P.A. Kropachev, G.M. Rakhimova, Modified concrete for producing pile foundations, Magazine of Civil Engineering, 2019, 86, 2, 3-10.
2. Y. Ohama, Recent Progress in Research and Development Activities of Polymer Mortar and Concrete in Japan, 4th Asia Symposium on Polymers in Concrete, 2003, 39-47.
3. W. Brachaczek, A. Chlebos, Z. Giergiczny, Influence of Polymer Modifiers on Selected Properties and Microstructure of Cement Waterproofing Mortars, Materials, 2021, 14, 7558.
4. Z. Su, J.M. Bijen, J.A. Larbi, Influence of polymer modification on the hydration of portland cement, Cement and Concrete Research, 1991, 21, 2-3, 242-250.
5. P-H. Park, K.Lee, The Influence of Polymers on the Hydration of Modified Cement System, Journal of The Korean Ceramic Society, 2007, 44, 496-501.

6. A.M. Hameed, M.T. Hamza, Characteristics of polymer concrete produced from wasted construction materials, *Energy Procedia*, 2019, 157, 43-50.
7. K-S. Yeon, Polymer Concrete as Construction Materials, *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.*, 2010, 17, 2, 107-111.
8. S. Andayani, R. Suratman, I. Imran, Polymer Modified Concrete of Blended Cement and Natural Latex Copolymer: Static and Dynamic Analysis, *Open Journal of Civil Engineering*, 8, 2, 2018, 205-220.
9. X.M. Kong, C.C. Wua, Y.R. Zhang, J.L. Li, Polymer-modified mortar with a gradient polymer distribution: preparation, permeability, and mechanical behaviour, *Construct. Building Mater.*, 2013, 38, 195-203.
10. S.K.M. Pothinathan, M. Muthukannan, S. Narayanan, Comparison of bond strength analysis on the interfacial layer of old and new concrete using latex, epoxy and glycoluril, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2020, 983, 012006.
11. M. Brocard, *Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics*. 1960, 13, 156, 1355-1418.
12. O.M. Pshinko, A.V. Krasniuk, B.H. Klochko, O.V. Hromova, V.V. Palii, Repair material modification by polymeric additives while transport repairing of buildings and engineering structures, *Science and Transport Progress, Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2010, 35, 145-149.
13. A. Bhutta, Y. Ohama, Recent status of research and development of concrete-polymer composites in Japan, 2010, *Concr Res Lett.* 1, 125-130.
14. H. Ma, Z. Li, Microstructures and mechanical properties of polymer modified mortars under distinct mechanisms, *Construct. Building Mater.*, 2013, 47, 579-587.
15. Дворкін Л.Й., Бордюженко О.М., Шостак С.П. Самоущільнювальні дрібнозернисті золо-цементні суміші з поліфункціональним модифікатором / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. – Рівне. – "Волинські обереги", 2023. Вип. 43. С. 13-20.
16. L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov. *Multi-Parametric Concrete Compositions Design*. Nova Science Publishers, New York. 2013. 223 p.
17. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals / K. Yoshioka, E. Tazawa, K. Kawai, T. Enohata. *Cem. Concr. Res.* 2002. Vol. 32, No 10. P. 1507–1513.
18. Q. Wang, C. Taviot-Gueho, F. Leroux, K. Ballerat-Busserolles, C. Bigot, Superplasticizer to layered calcium aluminate hydrate interface characterized using model organic molecules, *Cement and Concrete Research*, 2018, 110, 52-69.
19. M. Alonso, M. Palacios, F. Puertas, Effect of Polycarboxylate-Ether Admixtures on Calcium Aluminate Cement Pastes, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52, 17330-17340.