УДК 666.972:54.052

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СОСТАВОВ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОКРЕМНЕЗЕМА И МИКРОКРЕМНЕЗЕМА

Потапов В.В., Горев Д.С.

ФГБУН «Научно-исследовательский геотехнологический центр» ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, e-mail: vadim_p@inbox.ru

Сопоставлено влияние на прочность мелкозернистого бетона добавок нано- и микрокремнезема. Влияние добавок оценивалось по показателям прочности при сжатии и изгибе. Выявлен диапазон добавок нанопорошка кремнезема, при котором прочность при сжатии и изгибе увеличивается. За пределами этого диапазона прочность при сжатии и изгибе снижается с увеличением дозы. Выполнены эксперименты на прочность бетона с применением золя нанокремнезема и определены зависимости прочности при сжатии и изгибе от дозы SiO_2 . Установлены определенные зависимости прочности при сжатии и изгибе от дозы микрокремнезема. В целом полученные данные позволили сопоставить активность нано- (в форме порошка и золя) и микрокремнезема. Показано, что применение добавок в виде золь нанокремнезема является технологически более эффективным. При существенно меньшем расходе нанокремнезема по сравнению с микрокремнеземом достигается сходный эффект повышения прочности бетона. Кроме того, ввод в замес жидкой добавки осуществить проще, чем сухого порошка. По сравнению с сухим порошком в случае жидкой добавки легче обеспечить однородное распределение нанодисперсного диоксида кремния по объему замеса.

Ключевые слова: нанокремнезем, микрокремнезем, золь, прочность бетона при сжатии и изгибе, наночастицы

THE RESULTS OF TESTS OF THE COMPOSITIONS OF FINE-GRAINED CONCRETE WITH ADDITION OF NANOSILICA FUME AND MICROSILICA

Potapov V.V., Gorev D.S.

Research Geotechnological Center FEBRAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: vadim_p@inbox.ru

The influence of nano- and microsilica additives on the strength of fine-grained concrete is compared. The effect of additives was evaluated by the parameters of compressive and bending strength. The range of additives of silica nanopowder, in which the compressive and bending strength increases, is revealed. Outside this range, compressive and bending strength decreases with increasing dose. Experiments on the strength of concrete with the use of nanosilica sol were performed, and the dependence of the compressive and bending strength on the dose of SiO_2 was determined. You installed certain dependencies of compressive strength and Flexural strength of the dose of silica fume. In General, the obtained data allowed to compare the activity of nano – (in the form of powder and sol) and microsilica. It is shown that the use of additives in the form of nanosilica sols is technologically more effective at a significantly lower consumption of nanosilica compared to microsilica, a similar effect of increasing the strength of concrete is achieved. In addition, the introduction of a liquid additive into the batch is easier than dry powder. In comparison with dry powder in the case of liquid additives, it is easier to ensure a uniform distribution of nanodispersed silicon dioxide in the volume of mixing.

Keywords: nanosilica, microsilica, sol, the strength of concrete in compression and bending, nanoparticles

Нанодисперсный диоксид кремния в настоящее время является одним из самых востребованных наноматериалов. Наноразмерный SiO_2 применяют в микро- и оптоэлектронике, используют в качестве добавок в производстве полимерных и строительных материалов, бумаги, включают в состав стекол, лакокрасочных, огнеупорных, антикоррозионных покрытий [1–2].

Наночастицы SiO_2 способны повышать прочность бетона [3–4]. Наночастицы SiO_2 , имеющие высокую площадь поверхности и высокую скорость пуццолановой реакции, увеличивают скорость образования гидратов силикатов кальция, также снижают пористость бетона и повышают его плотность. В то же время накоплен значительный опыт применения в составе бетонов микрокремнезема для повышения прочности и улучшения других характеристик бетона [5–6].

Цель работы: сопоставление влияния на прочность бетона нанокремнезема и микрокремнезема.

Испытания экспериментальных составов

Образцы формовались и испытывались на прочность по ГОСТ 31357-2007. Смешение ингредиентов проводили на смесителе по ГОСТ 31356-2007; водные суспензии нанокремнезема и микрокремнезема делали с помощью ультразвуковой мешалки.

Образцы мелкозернистого бетона изготавливались в форме балочек. Контрольный состав замеса приведен в табл. 1.

Перед формованием проводили штыковку и встряхивание.

Расход нанокремнезема был следующим (в % от цемента): 0,001; 0,01; 0,1; 1; 5; 10. Нанокремнезем при дозировках 0,001; 0,01; 0,1; 1 %, вводился в виде водной суспензии. Для

приготовления суспензии использовалась ультразвуковая мешалка. Режим смешивания подбирался исходя из обеспечения однородности и стабильности суспензии. При расходе 5%, 10% нанокремнезем вводился в сухую смесь с последующим перемешиванием в лопастном смесителе (табл. 2).

Расход микрокремнезёма был следующим (в% от цемента): 0,1; 1; 3; 5; 8; 10. Микрокремнезем при дозировках 0,1%, 1%, вводился в виде водной суспензии. Для приготовления суспензии использовалась ультразвуковая мешалка. Смешение микрокремнезема проводили так же, как нанокремнезема. При расходе 3; 5; 8; 10% микрокремнезем вводится в сухую смесь с последующим перемешиванием в лопастном смесителе (табл. 3).

Повышение прочности бетона вводом нанокремнезема

Расход золя нанокремнезема был таким (в% от цемента в пересчете на сухое вещество): 0,01; 0,1. Характеристики золой МВ и ГВ, использованных в эксперименте были: плотность золя

ГВ = 1160 г/дм³, [SiO₂] = 260 г/дм³; плотность золя МВ = 1085 г/дм³, [SiO₂] 140 г/дм³.

Образцы мелкозернистого бетона испытывали в соответствии ГОСТ 310.4-81.

При расходе нанопорошка SiO₂ от 0,01 % до 1 % относительно расхода цемента прочность при сжатии и изгибе возрастала. При расходе SiO₂ более 1 % прочность при сжатии и изгибе снижалась (рис. 1, 2).

Таблица 1

Экспериментальная рецептура контрольного состава мелкозернистого бетона

Компонент	Дозировка, %
Портландцемент ПЦ М500ДО Н (ОАО Вольскцемент)	25
Песок ПБ 150-1 (ЗАО Сибелко Рус)	75
Вода	20

Таблица 2

Экспериментальный состав мелкозернистого бетона с нанокремнеземом

Компонент	Дозировка, %
Портландцемент ПЦ М500ДО Н (ОАО Вольскцемент)	25
Песок ПБ 150-1 (ЗАО Сибелко Рус)	75
Нанокремнезем	0–2,5
Вода	20

Таблица 3

Экспериментальный состав мелкозернистого бетона с микрокремнеземом

Компонент	Дозировка, %
Портландцемент ПЦ М500ДО Н (ОАО Вольскцемент)	25
Песок ПБ 150-1 (ЗАО Сибелко Рус)	75
Микрокремнезем (компания ELKEM)	0–2,5
Вода	20

Рис. 1. Зависимость прочности изгибе от расхода нанопорошка SiO₂

Рис. 2. Зависимость прочности сжатия от расхода нанопорошка SiO_2

Рис. 3. Прочность при изгибе образцов с добавкой нанокремнезема по сравнению с контрольным образцом

Рис. 4. Прочность при сжатии образцов с добавкой нанокремнезема

Рис. 5. Прочность при изгибе при различных дозах микрокремнезёма

Рис. 6. Прочность при сжатии при различных дозах микрокремнезема

Рис. 7. Прочность при изгибе образца с добавкой микрокремнезема по сравнению с контрольным образцом

Рис. 8. Прочность при сжатии образца с добавкой микрокремнезема по сравнению с контрольным образцом

*Повышение прочности бетона
вводом микрокремнезема*

Прочность при изгибе возрастала при расходе SiO_2 0,1–5%, при расходе SiO_2 выше 5% – уменьшалась (рис. 3, 4). Прочность при сжатии начинала увеличиваться при расходе SiO_2 0,1–6%, и продолжала возрастать при расходе SiO_2 7–10% (рис. 5–8).

*Повышение прочности бетона
вводом золя нанокремнезема*

При расходе SiO_2 от 0,01% до 0,1% золя нанокремнезема ГВ прочность при сжатии и изгибе возрастала (табл. 4), добавление

золя нанокремнезема МВ не привело к росту прочностных показателей (рис. 9, 10).

Содержание SiO_2 (94,59%) в нанокремнеземе превышает содержание SiO_2 (84,12%) в микрокремнеземе (табл. 5). Как показал рентгенофазовый анализ, порошок нанокремнезема полностью аморфный, в микрокремнеземе доля SiO_2 в кристаллической форме – 1,81%, в аморфной форме – 83%. Химическая активность кремнезема в пуццолановой реакции выше в аморфной форме, чем в кристаллической. Результаты сравнительных физико-механических испытаний нанокремнезема и микрокремнезема приведены на рис. 11, 12.

Таблица 4

Прочность при сжатии и изгибе в зависимости от расхода золей

Образец	Контрольный	Золя нанокремнезема ГВ		Золя нанокремнезема МВ	
% добавки	0	0,01	0,1	0,01	0,1
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	2,69	3,23	3,23	2,90	2,33
Прочность при сжатии, МПа	12,53	14,38	15,27	11,11	11,68

Количество добавки (относительно количества цемента), %

Рис. 9. Прочность при изгибе в зависимости от расхода золя

Количество добавки (относительно количества цемента), %

Рис. 10. Прочность при сжатии в зависимости от расхода золя

Таблица 5

Химический состав нанокремнезема и микрокремнезема

Элемент	Содержание в нанокремнеземе $W_p, \%$	Содержание в микрокремнеземе $W_p, \%$
Na ₂ O	02.03	01.45
MgO	00.00	04.44
Al ₂ O ₃	01.37	01.10
SiO ₂	94.59	84.12
SO ₃	00.58	00.91
Cl ₂ O	00.99	00.35
K ₂ O	00.00	02.74
CaO	00.44	01.34
Fe ₂ O ₃	00.00	02.14
ZnO	00.00	01.41

Количество добавки (относительно количества цемента), %

Рис. 11. Прочность при изгибе образцов с добавками нано- и микрокремнезема

Количество добавки (относительно количества цемента), %

Рис. 12. Прочность при сжатии образцов с добавками нано- и микрокремнезема

Выводы

1. Эксперименты показали, что при дозировках нанопорошка SiO₂ от одной сотой до одного процента относительно цемента прочности при сжатии и изгибе повыша-

ются. За пределами этого диапазона рост прочности сменяется снижением этих показателей.

2. При дозировках порошка микрокремнезема SiO₂ от одной десятой до пяти про-

центом относительно цемента прочность при изгибе увеличивается, при дозировке свыше пяти процентов начинает снижаться. Рост прочности при сжатии происходит монотонно при дозировке микрокремнезема свыше 6%.

3. При использовании в качестве добавки золя нанокремнезема он проявляет свою активность при значительно меньших дозах (в 50–100 раз) по сравнению с микрокремнеземом. Это можно объяснить в первую очередь тем, что нанокремнезем имеет более высокую удельную поверхность.

4. Использование золь в виде добавок, повышающих прочность бетона, более эффективно вследствие того, что предприятия по производству бетона, как правило, оборудованы дозаторами жидких добавок и ввод жидкой добавки в бетонный раствор осуществить проще, чем ввод сухого порошка.

Список литературы

1. Суздаев И.П. Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов: изд. 2, испр. М.: Техносфера, 2009. 592 с.
2. Потапов В.В., Грушевская Е.Н., Леонович С.Н. Модифицирование гидротермальным нанокремнеземом материалов на основе цемента // Строительные материалы. 2017. № 7. С. 4–9.
3. Flores-Vivian I., Pradoto R. G.K., Moini M., Kozhukhova M., Potapov V., Sobolev K. The effect of SiO₂ nanoparticles derived from hydrothermal solutions on the performance of portland cement based materials. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2017. P. 1–10.
4. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 309 с.
5. Кравцов А.В., Цыбакин С.В., Евсеева Т.М., Соболев К.Г., Потапов В.В. Литые бетоны с использованием отходов медеплавильного производства и нанокремнезема // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 9 (108). С. 1010–1018.
6. Нанотехнологии. Азбука для всех / Под ред. Ю.Д. Третьякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.