

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ НА РЯДОВЫХ МАТЕРИАЛАХ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Д.В. Матвеев, И.М. Иванов, Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Разработаны составы серии самоуплотняющегося бетона классов В30–В40. Установлено, что на стабилизацию реологических свойств самоуплотняющейся бетонной смеси наибольший эффект оказывает тонкомолотый доменный гранулированный шлак. С целью получения высокой подвижности бетонных смесей и требуемых свойств бетонов, при использовании поликарбоксилатов необходимо применение чистых крупных и мелких заполнителей (песок и щебень) и исключение в их составе присутствия глинистых минералов.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, поликарбоксилатный суперпластификатор, микрозаполнитель, доменный гранулированный шлак.

Введение

На протяжении последнего десятилетия в российской строительной индустрии резко возрос интерес к относительно новой разновидности основного конструкционного материала, а именно к самоуплотняющимся бетонам (в международной терминологии – Self-Compacting Concrete). Самоуплотняющийся бетон (СУБ) – это композиционный материал, который в свежеприготовленном состоянии способен самостоятельно уплотняться под собственным весом без воздействия на него дополнительной внешней уплотняющей энергии и полностью заполняет пространство между арматурными стержнями и опалубкой конструкции.

Использование данного вида бетона позволяет обеспечить:

- надежное уплотнение, в том числе и густоармированных конструкций сложной конфигурации;
- высокое качество бетонной поверхности;
- сокращение сроков строительства;
- снижение трудоемкости, устранение шума и вибрации при укладке бетонной смеси [1].

История создания самоуплотняющегося бетона берет свое начало с конца 1980-х годов, когда в Японии профессором Хаймой Окамурой была разработана высокоэффективная добавка – суперпластификатор нового поколения на базе эфиров полиакрилатов и поликарбоксилатов, значительно повышающая реологические свойства бетонной смеси, таких как подвижность, сохраняемость и удобоукладываемость. Ему удалось создать бетон с высокой подвижностью при низком содержании воды. Совместно с Окамурой в создании и развитии самоуплотняющегося бетона принимали участие профессора К. Маекава и К. Озава [2]. Даль-

нейшее развитие и изучение СУБ происходило в Германии. В 2000–2001 годах в Институте строительных исследований в городе Аахен под руководством профессора В. Брамесхубера по заказу фирмы «Dyckerhoff Beton GmbH» были проведены глубокие исследования свойств самоуплотняющегося бетона, целью которых являлось дать оценку этому материалу и внедрить его по всей Европе [3]. В итоге, в ноябре 2003 года «Немецким комитетом по железобетону» в Берлине публикуется нормативный документ «DAfStb – Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie)», согласно которому самоуплотняющийся бетон был официально допущен и разрешен к использованию в Европе. В данном документе были подробно изложены термины и связи самоуплотняющегося бетона с другими европейскими нормативными документами и материалами, а также методы их диагностики.

Эффект самоуплотнения бетонной смеси достигается за счет введения двух дополнительных компонентов: первый – это высокоэффективный суперпластификатор; второй – тонкомолотый наполнитель. По этой причине СУБ называют пятикомпонентным бетоном в отличие от обычного – трехкомпонентного [4]. В качестве высокодисперсного минерального материала можно применять: микрокремнезем, золу-уноса, доменный гранулированный шлак и другие активные шлаки черной и цветной металлургии, а также инертные наполнители – каменную муку, неактивные отходы промышленности и специально приготовленные тонкодисперсные карбонатные порошки (микрокальцит).

В настоящее время теория проектирования составов самоуплотняющихся бетонов еще не раз-

работана [5]. Реологические характеристики этих бетонов очень чувствительны к соотношению компонентов, составу и свойствам используемых материалов. Поэтому подбор ведется опытным путем. Однако при разработке состава самоуплотняющегося бетона часто пользуются основными концепциями методики Окамуры, которая базируется на принципе «от цементного молока к бетону» и представлена в табл. 1 [6].

Согласно методике Окамуры, первоначально подбирается пластифицирующая добавка, микронаполнитель и водоцементное отношение для получения цементного теста с определенной текучестью. Затем подбирается расход крупного и мелкого заполнителя, оценивается показатель текучести бетонной смеси и оптимизируется состав до получения необходимого результата.

По мнению В.И. Калашникова [7] при производстве самоуплотняющихся бетонов необходимо преодолеть ряд противоречивых факторов: обеспечить высокую текучесть бетонной смеси, исключить ее расслаиваемость, достичь высокой прочности. Одним из способов решения данной задачи является обеспечение достаточно высокой раздвижки зерен крупного и мелкого заполнителя. Решить эту задачу дополнительным введением пластификатора нельзя, так как будет наблюдаться расслоение смеси, а введение тонкодисперсного наполнителя дает положительный результат, тем более, что оптимальное разбавление цемента инертным материалом не приводит к серьезной потере прочности, по сравнению с обычным бетоном, вследствие снижения водоцементного отношения [5].

Еще одной проблемой при создании самоуплотняющихся бетонов в России является использование загрязненных мелких заполнителей (песков), которые в зависимости от региона могут содержать в себе глинистые и (или) илестые частицы в том или ином количестве. Наличие примесей негативно сказывается на эффективности действия суперпластификатора, который осажаясь на частицах глин, теряет свою эффективность [8, 9]. Это приводит к значительному перерасходу добавки и, как следствие, удорожанию бетонной смеси.

Поэтому в настоящий момент стоит задача в получении самоуплотняющегося бетона не только с определенными функциональными характери-

стиками, но и в получении устойчивой, стабильной структуры материала, независимой от колебаний свойств исходных компонентов и их состава.

Цель и задачи исследования

Цель работы – создание на рядовых материалах Челябинской области стабильных по свойствам самоуплотняющихся бетонов классов В30–В40.

Задачи:

- создание бетонной смеси с высокой степенью подвижности;
- обеспечение ее сохраняемости более 2 часов;
- подбор наиболее оптимального и эффективного микронаполнителя для СУБ;
- создание бетонной смеси с постоянными стабильными свойствами.

Материалы и методы исследования

Для разработки составов самоуплотняющихся бетонов использовали следующие материалы:

Вяжущее – портландцемент ЦЕМ I 42,5 производства ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент» г. Коркино Челябинская область, соответствующий требованиям ГОСТ 31108.

Крупный заполнитель – щебень фракции 5–20 мм из гранодиоритовой изверженной интрузивной горной породы, с маркой по морозостойкости F₂₃₀₀ и с содержанием пылеватых и глинистых частиц – 0,65 %, производства ОАО «Первая нерудная компания» п. Федоровка Челябинская область, соответствующий ГОСТ 8267.

Мелкий заполнитель – песок из отсева дробления II класса с модулем крупности 2,76 мм производства ООО «Спецтехпроект» г. Коркино Челябинская область, соответствующий требованиям ГОСТ 31424.

Наполнитель – зола-уноса производства «Рефтинская ГРЭС» (п. Рефтинский, Свердловская область), соответствующая ТУ 5717-004-79935691.

Наполнитель – доменный гранулированный кислый шлак, размолотый до удельной поверхности S_y=3700 см²/г производства ОАО «ЧМК» г. Челябинск, соответствующий ГОСТ 3476.

Наполнитель – микрокремнезем конденсированный неуплотненный марки МК-85 производства ОАО «ЧЭМК», соответствующий ТУ 5743-048-02495332.

Пластифицирующая добавка – суперпласти-

Таблица 1

Основные этапы подбора состава самоуплотняющегося бетона по методу Окамуры

| | |
|---|--|
| Оценка содержания воздуха в бетонной смеси | 2–4 % в общем объеме |
| Определение содержания крупного заполнителя в бетоне (Ø>4 мм) | < 50 % в общем объеме |
| Определение содержания мелкого заполнителя в растворе (0,125 мм < Ø < 4 мм) | < 40 % в общем объеме |
| Отношения количества воды к мелкодисперсным составляющим | вода / (вяжущее+ наполнитель) = 0,8 - 0,9 |
| Оптимизация свойств цементного теста и раствора Расплав конуса, определение текучести воронкой | расплав конуса 25 ± 1 см время истечения 9–11 с |
| Оптимизация свойств бетона Расплав конуса, определение текучести воронкой | расплав конуса 65 ± 5 см время истечения 5–20 с |

фикатор MasterGlenium SKY 591 производства ООО «БАСФ Строительные системы» д. Б. Толбино Московская область, соответствующая СТО 70386662-310.

Подвижность бетонной смеси оценивали методами, изложенными в [10]. Испытания бетонов на прочность проводили согласно [11].

При разработке составов самоуплотняющегося бетона первоначально был выбран наиболее эффективный суперпластификатор — MasterGlenium SKY 591, согласно рекомендациям, изложенным в СТО 70386662-306-2013. Затем были подобраны наиболее распространенные в нашем регионе микронаполнители, такие как: микрокремнезем, зола-уноса, доменный гранулированный шлак. Далее цемент вместе с пластификатором и микронаполнителем в разных дозировках затворяли водой с различным водоцементным отношением. Затем с помощью конуса (высота – 60 мм, нижнее основание – 75 мм, верхнее основание – 100 мм) оценивали показатели расплыва и текучести цементного теста. По результатам данного эксперимента были отобраны наиболее подходящие составы, сочетающие в себе высокую подвижность и не имеющие водоотделения. Далее на основании полученных данных разрабатывали самоуплотняющийся бетон. Количество мелкого и крупного заполнителя выбирали исходя из рекомендаций методики Окамуры: насыпной объем заполнителя крупной фракции должен быть не более 50%, а объемная часть песка - не более 40 % от объема бетона (табл. 1). В качестве мелкого заполнителя было решено использовать песок из отсева дробления, так как в обычных природных песках возможно присутствие илистых и (или) глинистых частиц, которые отрицательно влияют на эффективность суперпластификатора [8, 9, 12]. Частицы глины адсорбируют на себе поликарбоксилаты и блокируют их воздействие на цемент, в результате необходимо увеличение дозировки дорогостоящей добавки, из-за снижения ее эффективности, что

приводит к увеличению стоимости самого бетона. Кроме того, количество глинистых частиц может варьироваться в песке в зависимости от партии, тем самым это усложняет работу операторам, которым необходимо добиваться постоянства и стабильности свойств выпускаемой ими продукции, корректируя уже имеющуюся технологию производства СУБ. Поэтому применение искусственного песка из отсева дробления может быть оптимальным вариантом для получения в конкретных условиях самоуплотняющегося бетона, к тому же, являясь побочным продуктом дробления щебня, он имеет сравнительно низкую стоимость.

Экспериментальные данные и их результаты

Согласно рекомендациям Окамуры, были подобраны предварительные составы СУБ и проведена оценка свойств бетонных смесей и бетонов, полученные результаты помещены в табл. 2.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы: введение в бетон в качестве наполнителя микрокремнезема способствует значительному увеличению его прочности в поздние сроки твердения, однако он негативно влияет на реологические свойства СУБ, увеличивая водопотребность смеси и незначительно увеличивая подвижность. Введение золы-уноса положительно сказывается на свойствах бетонной смеси, улучшается текучесть, подвижность и удобоукладываемость, но воздействие золы-уноса на повышение прочности бетона незначительно. Использование доменного гранулированного шлака наиболее эффективно проявляет свои свойства в самоуплотняющихся бетонах. С одной стороны, он выступает как хороший тонкодисперсный наполнитель, обеспечивая повышение реологических свойств смеси, с другой стороны, проявляет себя в качестве активной составляющей вяжущего и позволяет бетону набирать дополнительную прочность в поздние сроки твердения.

По результатам исследования можно выде-

Таблица 2

Предварительные составы самоуплотняющегося бетона (кг/м³)

| Состав/ № эксперимента | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|------|
| Цемент | 470 | 450 | 470 | 450 | 350 | 450 | 450 | 300 | 400 | 450 |
| Песок | 1100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Щебень | 850 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 |
| Зола-уноса | 90 | 80 | 80 | 80 | 70 | 100 | 50 | 30 | 70 | 50 |
| Шлак | – | – | – | – | – | 100 | 50 | 150 | 100 | 50 |
| Микрокремнезем | – | 10 | 37 | 20 | 52 | – | – | – | – | 36 |
| Суперпластификатор | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Вода | 242 | 227 | 245 | 235 | 229 | 256 | 242 | 211 | 230 | 260 |
| Отклики | | | | | | | | | | |
| Расплав конуса, см | 55–60 | 60–65 | 47–50 | 55–60 | 50 | 65–70 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Расплав конуса через 120 мин, см | 45 | 55–60 | 40–45 | 45 | 50 | 65–70 | 60–65 | 60 | 60 | 60 |
| Прочность на 3 сут., МПа | 36 | 35 | 35 | 35 | 22 | 28 | 31 | 23 | 29 | 26 |
| Прочность на 7 сут., МПа | 42 | 40 | 40 | 46 | 32 | 36 | 36 | 29 | 33 | 29 |
| Прочность на 28 сут., МПа | 46 | 48 | 58 | 56 | 36 | 46 | 44 | 39 | 49 | 37 |

Строительные материалы и изделия

лить несколько наиболее оптимальных составов с хорошими функциональными свойствами, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3
Разработанные составы самоуплотняющегося бетона класса В30, В35, В40 (кг/м³)

| Состав/ Класс бетона | В30 | В35 | В40 |
|----------------------------------|------|-------|------|
| Цемент | 300 | 450 | 430 |
| Песок | 1000 | 1000 | 1000 |
| Щебень | 750 | 750 | 750 |
| Зола-уноса | 30 | 100 | 70 |
| Шлак | 150 | 100 | 100 |
| Микрокремнезем | – | – | – |
| Суперпластификатор | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Вода | 211 | 256 | 230 |
| Отклики | | | |
| Распływ конуса, см | 60 | 65–70 | 60 |
| Распływ конуса через 120 мин, см | 60 | 65–70 | 60 |
| Прочность на 3 сут, МПа | 23 | 28 | 29 |
| Прочность на 7 сут, МПа | 29 | 36 | 33 |
| Прочность на 28 сут, МПа | 38 | 46 | 49 |

Из полученных результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- На рядовых материалах были разработаны и апробированы составы самоуплотняющихся бетонов классов: В30, В35, В40.
- Благодаря использованию в качестве наполнителя в СУБ доменного гранулированного шлака была получена высокая подвижность и сохраняемость бетонной смеси, а также обеспечено дополнительное повышение прочности бетона в поздние сроки твердения за счет пуццолановой активности шлака.
- Для стабилизации эффективности действия суперпластификатора было предложено использование в качестве мелкого заполнителя искусственного песка из отсева дробления щебня, исключая присутствие в их составе примесей глины.

Литература

1. Оучи, М. Самоуплотняющиеся бетоны: разработка, применение и ключевые технологии /

М. Оучи // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: труды 1-й Всерос. конф. по бетону и железобетону. – М., 2001. – С. 209–215.

2. Okamura, H.M. Self-compacting concrete. / H.M. Okamura, M. uchi // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2003. – Vol. 1(1). – P. 5–15.

3. Self-Consolidating Concrete: Reported by ACI Com mittee 237 / American Concrete Institute. April 2007. [Farmington Hills]: ACI, 2007, 32 p.

4. Horst, G. Self compacting concrete – another stage in the development of the 5-component system of concrete / G. Horst, R. Joerg // Betontechnische Berichte, Verein Deutscher Zementwerke, Dusseldorf, 2001. – P. 39–48.

5. Шестернин, А.И. Основы технологии самоуплотняющегося бетона / А.И. Шестернин, М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина // Молодой ученый. – 2015. – № 6. – С. 226–228.

6. Okamura, H. Mix design for self-compacting concrete. / H. Okamura, K. Ozawa. // Concrete Library of the JSCE, 1995. – №. 25. – P. 107–120.

7. Калашиников, В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / В.И. Калашиников // Строительные материалы, 2008. – № 10. – С. 4–6.

8. Lei, L. A concept for a polycarboxylate superplasticizer possessing enhanced clay tolerance / L. Lei, J. Plank // Cem. Concr. Res.2012. – Vol. 42. – P. 118–123.

9. Ng S. Interaction mechanisms between Na montmorillonite clay and MPEG-based polycarboxylate superplasticizers [J]. / S. Ng, J. Plank // Cement and Concrete Research, 2012. – Vol. 42. – P. 847–854.

10. СТО 70386662-306-2013 «Добавки на основе эфиров поликарбоксилатов для изготовления вибрационных и самоуплотняющихся бетонов». 2013.

11. ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». 2012.

12. Long, Xiong. Effect of typical clay upon the dispersion performance of polycarboxylate superplasticizer [A. / Xiong Long, Guangjun Zheng, Yao Bi, Chengfei Fu // Proceedings of 2015 International Conference on Materials, Environmental and Biological Engineering (MEBE 2015)[C]. 2015.

Матвеев Денис Валерьевич, магистрант кафедры «Строительные материалы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), 7777@mail.ru

Иванов Илья Михайлович, магистрант кафедры «Строительные материалы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ila575-2011@mail.ru

Черных Тамара Николаевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные материалы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), chernykhtn@susu.ru

Крамар Людмила Яковлевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные материалы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), kramarli@susu.ru

Поступила в редакцию 20 июня 2016 г.

DEVELOPMENT AND STUDY OF SELF-COMPACTING CONCRETE CHARACTERISTICS USING THE MATERIALS OF THE CHELYABINSK REGION

D.V. Matveyev, 7777@mail.ru
I.M. Ivanov, ila575-2011@mail.ru
T.N. Chernikh, chernykhtn@susu.ru
L.Ya. Kramar, kramarli@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Composition of the self-compacting concrete B30-B40 is developed. It is proved that a fine granulated blast-furnice slag has a strong influence on stabilization of rheological properties of self-compacting concrete. It is necessary to use clean coarse and fine aggregates (sand and gravel) when using polycarboxylates with the aim of getting high workability of concrete mixture.

Keywords: self-compacting concrete, polycarboxylate superplasticizer, microfiller, granulated blast-furnice slag

References

1. Ouchi M. [Self-Compacting Concrete: Development, Application and Key Technologies]. *Beton na rubezhe tret'ego tysyacheletiya: trudy 1-y Vseros. konf. po betonu i zhelezobetonu* [The Concrete in the Third Millennium: Proceedings of the 1st All-Russia. Conf. on Concrete and Reinforced Concrete]. Moscow, 2001, pp. 209–215 (in Russ.).
2. Okamura H. M. Ouchi M. [Self-Compacting Concrete]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, vol. 1(1), pp. 5–15.
3. [Self-Consolidating Concrete]. [Reported by ACI Committee 237. American Concrete Institute. April 2007]. Farmington Hills, ACI Publ., 2007, 32 p. ISBN 978-0-87031-244-1.
4. Horst G., Joerg R. [Self Compacting Concrete – Another Stage in the Development of the 5-Component System of Concrete]. *Betontechnische Berichte, Verein Deutscher Zementwerke* [Concrete Technical Reports The German Association of Cement Works], Dusseldorf, 2001, pp. 39–48.
5. Shesternin M.O. Korovkin N.A. Eroshkina A.I. [The Basic Technology of Self-Compacting Concrete]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist]. 2015, no. 6, pp. 226–228 (in Russ.).
6. Okamura H., Ozawa K. [Mix Design for Self-Compacting Concrete]. *Concrete Library of the JSCE*, 1995, no. 25, pp. 107–120.
7. Kalashnikov V. I. [The Calculated Composition of High-Strength Self-Compacting Concrete]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials]. 2008, no. 10, pp. 4–6 (in Russ.).
8. Lei L., Plank J. [A Concept for a Polycarboxylatesuperplasticizer Possessing Enhanced Clay Tolerance]. [Cem. Concr. Res.]. 2012, vol. 42, pp. 118–123.
9. Ng S., Plank J. [Interaction Mechanisms Between Na Montmorillonite Clay and MPEG-Based Polycarboxylatesuperplasticizers]. [Cement and Concrete Research]. 2012, vol. 42, pp. 847–854.
10. STO 70386662-306-2013. *Dobavki na osnove efirov polikarboksilatov dlya izgotovleniya vibratsionnykh i samouplotnyayushchikhsya betonov* [Additive on the Basis of Ether Polycarboxylates for the Manufacture of Vibrating and Self-Compacting Concrete]. 2013.
11. GOST 10180-2012. *Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam* [Concretes. Methods for Strength Determination Using Reference Specimens]. Moscow, 2013.
12. Xiong Long, Guangjun Zheng, Yao Bi, Chengfei Fu. [Effect of Typical Clay upon the Dispersion Performance of Polycarboxylatesuperplasticizer]. [Proceedings of 2015 International Conference on Materials, Environmental and Biological Engineering (MEBE 2015)]. 2015.

Received 20 June 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Разработка составов и исследование свойств самоуплотняющихся бетонов на рядовых материалах Челябинской области / Д.В. Матвеев, И.М. Иванов, Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 55–59. DOI: 10.14529/build160307

FOR CITATION

Matveyev D.V., Ivanov I.M., Chernikh T.N., Kramar L.Ya. Development and Study of Self-Compacting Concrete Characteristics Using the Materials of the Chelyabinsk Region. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2016, vol. 16, no. 3, pp. 55–59. (in Russ.). DOI: 10.14529/build160307