

*Yu, Q. L., PhD, Assistant Prof.; **Brouwers, H. J. H., Prof. Dr. Ir.,

Department of the Built Environment, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands

DESIGN OF LIGHTWEIGHT AGGREGATES COMPOSITES: AN INSIGHT INTO CALCIUM SULPHATE AND CEMENT AS BINDERS (PART II)



*Ю. К. Л., канд. наук, доцент; **Брауэрс Х. Дж. Х., д-р, проф.,

кафедра антропогенной среды, Технологический университет Эйндховена, Эйндховен, Нидерланды

ПОДБОР СОСТАВА КОМПОЗИТОВ НА ЛЕГКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ: АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ И ЦЕМЕНТА В КАЧЕСТВЕ ВЯЖУЩИХ (ЧАСТЬ II)

Часть I была опубликована в № 1 (33), 2014
Part I was published in No. 1 (33), 2014

3.1 Cement as binder

The cement used in this study is Ordinary Portland Cement (OPC) CEM I 52.5 N, provided by ENCI (the Netherlands). A polycarboxylic ether based superplasticizer is used to adjust the workability. Limestone powder is used as filler to adjust the powder content. Normal aggregates used are broken sands with two different fractions of 0–1 mm and 0–4 mm and micro-sand with the maximum particle size of 1 mm (Graniet-Import Benelux, the Netherlands). The used materials are summarized in **Table 3** and **Fig. 10**.

It is recommended that a water/powder ratio by volume of 0.85–1.10 is a suitable starting value for the water content determination in order to design self-compacting concrete [19], which is also confirmed by [11] who reported an optimal water/powder ratio by mass of 0.30. Due to the high fluidity, self-compacting concrete/mortar normally has a risk of segregation and blockage, which can be prevented by the use of a sufficient amount of fines (defined as particles with a size smaller than 125 μm). Hence, in the present study, the water amount, i. e. water/powder ratio is chosen as one of the research topics, and different water contents are used to investigate its effect.

Table 3. Properties of the used materials

Таблица 3. Свойства используемых материалов

Material // Материал	Type // Вид	Specific density, kg/m ³ // Удельная плотность, кг/м ³
Cement // Цемент	CEM I 52.5N	3180
Filler // Наполнитель	Limestone powder // Известняковая мука	2710
Fine sand // Мелкий песок	Micro-sand // Микроресок	2720
Fine sand // Мелкий песок	Sand 0–1 mm // Песок 0–1 мм	2650
Coarse sand // Крупный песок	Sand 0–4 mm // Песок 0–4 мм	2650
Superplasticizer // Суперпластификатор	Polycarboxylate ether // Эфир поликарбоксилата	1100

3.1 Использование цемента в качестве вяжущего

В настоящем исследовании использован обычный портландцемент (ОПЦ) CEM I 52.5N, представленный компанией ENCI (Нидерланды). Также для повышения удобоукладываемости применялся суперпластификатор (СП) на основе эфира поликарбоксилата. В качестве наполнителя был использован известняковая мука. В качестве заполнителя применялись два вида дробленного песка — с фракциями 0–1 мм и 0–4 мм, а также микроресок с максимальным размером частиц 1 мм (Graniet-Import Benelux, Нидерланды). Краткая характеристика используемых материалов приведена в **табл. 3** и на **рис. 10**.

При расчете точного объема воды затверения для изготовления самоуплотняющегося бетона рекомендуется значение отношения исходного объема воды к объему мелких фракций (менее 125 мкр), равное 0,85–1,10 [19]; при этом иногда указывается оптимальное массовое соотношение «вода / мелкие фракции», равное 0,30 [11]. В связи с высокой подвижностью самоуплотняющейся бетонной смеси обычно существует вероятность расслоения, которую

For the distribution modulus used in the A&A grading equation, a value of 0.25 for the mix design of self-compacting concrete recommended [11]. As discussed previously, a smaller distribution modulus leads to a mixture with a larger amount of fines. Thus, here two different values of 0.32 and 0.25 are applied in the self-compacting cement-based lightweight composite (SCLC) mixes as the preliminary design values to study their effect. For the vibrated cement-based lightweight composite (VCLC) design, a larger distribution modulus value of 0.35 is used, which is usually suitable for conventional vibrated concrete design [7]. A much lower water content is chosen (water/cement ratio (w/c) of 0.35 by mass), because on one hand this value is often used in conventional vibrated concrete design, and on the other hand a comparable density of mix VCLC to mix SCLC2 is set in order to study the relation between density and other properties.

Hence, applying the optimization algorithm, a preliminary design of the solid materials of three mixes is derived here and the dosages are shown in **Table 4**.

3.1.1 Fresh state behaviour analysis

The fresh state behavior analysis of the designed mixtures, especially in the case of the self-compacting composites, is essential because only by this step the final water content as well as the dosage of the superplasticizer can be determined. To reach the desired workability, the designed mix must have an optimal balance between the water content and the SP dosage. Insufficient dosage of the SP results in insufficient flowability; however, overdosing SP may lead to segregation, bleeding or to a negative influence on the hydration process. For normal weight self-compacting mortar, two workability parameters are usually investigated, i. e. the slump flow and the funnel time, which are used to assess the flowability and relative viscosity of the mixture, respectively.

The mini-slump flow test, performed in order to investigate the flowability of the designed composite, is carried out employing the Hägermann cone. The rheological properties of self-compacting cement paste using the mini-slump flow test were investigated. It was reported that the spread of the sample becomes stable at the time of 20 sec, which is in line with the duration of the measurement performed here [26]. The relative viscosity behavior of the sample is investigated by carrying out the V-funnel test, following the procedure described in [27] for mixes with the maximum particle size smaller than 4 mm.

Varied slump flow values from 240 to 330 mm and V-funnel times from 4 s to 11 s are reported for self-compacting normal weight aggregates concrete (SCNC) production [10, 11, 19, 27–30]. Different from SCNC, a great amount of fines is needed to bound the lightweight aggregates (LWA) in order to avoid the segregation of the developed composite due to the very low density of the LWA (**Table 1**, see No. 1 (33), 2014). Therefore, the viscosity of the mixture can be higher than for normal SCC concrete. Hence, in the present study a slump flow value

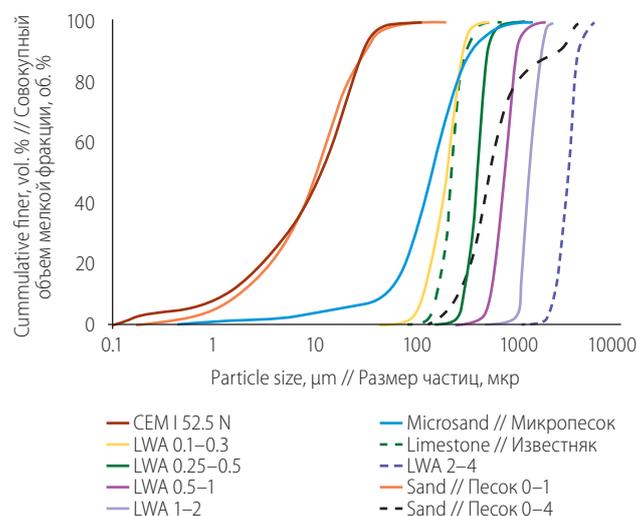


Fig. 10. Particle size distribution of the used materials.
Рис. 10. Гранулометрический состав смеси

можно предотвратить при условии использования достаточного количества мелких фракций (определяемых как частицы размером менее 125 мкр). Поэтому в данной работе в качестве одного из исследуемых аспектов выбрано необходимое соотношение «вода / мелкие фракции», которое варьировалось для изучения его влияния на показатели смеси.

Для модуля распределения, используемого в **уравнении 1** Андреасена и Андерсена (см. №1 (33), 2014), при подборе состава смеси для самоуплотняющегося бетона рекомендуется значение 0,25 [11]. Как уже обсуждалось ранее, более низкие значения модуля распределения приводят к образованию смеси с большим количеством тонких фракций. Таким образом, для приготовления смеси самоуплотняющегося легкого композита на основе цемента (SCLC) в качестве расчетной величины для изучения влияния модуля распределения применялись два значения — 0,32 (SCLC1) и 0,25 (SCLC2). При разработке виброуплотняемого легкого композита на основе цемента (VCLC) применяется более высокое значение модуля распределения — 0,35, которое является приемлемым для получения традиционного виброуплотняемого бетона [7]. При этом было решено заметно снизить содержание воды ($B/C = 0,35$), потому что, с одной стороны, такое значение часто используется при изготовлении традиционного виброуплотняемого бетона; с другой стороны, с целью изучения зависимости между плотностью и другими показателями для VCLC подбиралась плотность, сопоставимая с плотностью смеси SCLC2.

Таким образом, применяя алгоритм оптимизации, был получен предварительный состав трех смесей (**табл. 4**).

of 300 mm and V-funnel time value of 9–11 sec are chosen as the target values.

By slightly modifying the proportion of the solid ingredients and changing the amount of SP or the water content, trial experiments are performed in order to achieve the above mentioned target values. A maximum effective SP dosage of 1.0% by mass of the cement content is found here. The slump flow remains constant when increasing the SP amount from 1.0% up to 1.5% by mass of cement. This is in line with [11], who reported that from a certain dosage of superplasticizer (1.5% based on the cement content), the mixture (self-compacting mortar) will not respond anymore with an increase of the slump flow. This indicates that overdosing SP will not contribute to the flowability; on the contrary, it might cause problems such as segregation and delayed setting time.

The water content is modified in order to reach the desired density and the target flowability. The spread flow increases from 250 mm to 300 mm and V-funnel time decreases from 11 s to 6 s when the water/cement ratio increases from 0.45 to 0.60 with a fixed SP dosage of 1.0% by mass of cement; a water/cement ratio of 0.59 is finally selected to be used in the mix of SCLC1. The spread flow increases from 300 mm to 340 mm while the V-funnel time decreases from 16 s to 10 s when the water/cement ratio increases from 0.51 to 0.60 with a same fixed SP dosage. A water/cement ratio of 0.54 is finally selected for the mix of SCLC2.

It was reported that a V-funnel value between 4 and 6 s for a self-compacting cement mortar using normal weight aggregates, and also reported that a value of around 7.5 s already causes the blockage of the V-funnel, which apparently is shorter than the time obtained here, especially in the case of mix SCLC2 [11]. This can be explained by the large amount of powders used in these two mixes compared to the powder content used in the self-compacting mortar in [11]. The distribution modulus of 0.25 is used for the design of the mix SCLC2, which results in an even larger powder content in this mix than that of SCLC1, as can be seen in **Table 4**. However, to use such a large amount of fine materials is necessary to avoid the segregation of the mixture.

For the VCLC, two target values are used here, i. e. the density and the flow determined on a jolting table. The target density of the VCLC is chosen to be similar to the SCLC2 in order to compare their properties in hardened state. The flow test is carried out using a Hägermann cone and a jolting table (15 jolts) with a target flow value of 150 mm. Based on these, a final water/cement ratio of 0.38 is chosen and a SP dosage of 0.8 wt. % of cement.

3.1.2 Porosity

The designed composite is composed of lightweight aggregates, cement paste, sand, inert filler, and air. In the matrix, the porosity originates from both the internal porosity of LWA and from the porosity of the cement paste. It was reported that the exchange of air and water during

Table 4. Dosages of the developed mixes (per 1 m³)

Таблица 4. Состав разработанных смесей (на 1 м³)

Material // Материал	SCLC 1	SCLC 2	VCLC
CEM I 52.5 N, kg // кг	425.3	423.5	419.7
Limestone powder, kg // Известняковая мука, кг	111.9	259.6	0
Sand 0–4, kg // Песок 0–4, кг	0	0	407.0
Sand 0–1, kg // Песок 0–1, кг	0	95.6	0
Microsand, kg // Микроресек, кг	381.5	424.6	306.0
LWA 0.1–0.3, kg // кг	56.0	68.3	0
LWA 0.25–0.5, kg // кг	44.8	0	0
LWA 0.5–1.0, kg // кг	56.0	54.9	0
LWA 1.0–2.0, kg // кг	44.8	39.4	63.6
LWA 2.0–4.0, kg // кг	0	0	71.6
Water, kg // Вода, кг	250.9	230.3	159.4
SP, wt. % // СП, вес. %	1.0	1.0	0.8
w/c // В/Ц	0.59	0.54	0.38
q	0.32	0.25	0.35

3.1.1 Анализ показателей бетонной смеси

Анализ показателей полученных бетонных смесей, особенно в случае самоуплотняющихся композитов, — единственный способ определить точные количества воды затворения и суперпластификатора (СП). Для достижения заданных показателей удобоукладываемости разработанная смесь должна иметь оптимальное содержание воды и количество вводимого СП. Неправильная дозировка СП приводит к недостаточной подвижности смеси; при этом избыток СП может вызвать расслоение, водоотделение или негативно повлиять на процесс гидратации. Для стандартной самоуплотняющейся смеси обычно исследуют два параметра удобоукладываемости — осадку конуса и время вытекания смеси через V-образную воронку, которые используются для оценки соответственно подвижности и относительной вязкости смеси.

Мини-тест на растекаемость, выполняемый с целью изучения подвижности разработанного композита, производился с использованием конуса Хегерманна. С его помощью были исследованы реологические показатели самоуплотняющегося цементного теста. Расплыв образца прекращался через 20 сек, что соответствует данным, полученным в [26]. Относительная вязкость исследовалась с помощью теста с применением V-образной воронки по методике EFNARC, используемой для смесей с максимальным размером частиц менее 4 мм [27].

Для самоуплотняющегося бетона на плотных заполнителях (SCNC) в литературе сообщались значения расплыва от 240 до 330 мм и время вытекания смеси через V-образную воронку от 4 до 11 сек [10, 11, 19, 27–30]. В отличие от SCNC, для обеспечения стабильности бетонной смеси на легких заполнителях

the water absorption resulted in a rim of air bubbles in the interfacial transition zone (ITZ) of the lightweight aggregates concrete [15]. However, this does not seem to occur here, which will also be analyzed later. So here the porosity of the ITZ in the composite is assumed to be very small and therefore not considered in the calculation.

The internal porosity of the LWA is calculated from:

$$\varphi_{v,lwa} = \sum_{i=1}^n \varphi_{v,lwa,i} \times \varphi_{lwa,i} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{V_{lwa,i}}{V_{CLC}} \times \left(1 - \frac{\rho_{lwa,i}}{\rho_{slwa}} \right) \right] \quad (2)$$

where $\varphi_{v,lwa}$ is the porosity introduced by LWA in the designed composites, $\rho_{lwa,i}$ (g/cm³) is the apparent density of aggregate particles in fraction i , ρ_{slwa} (g/cm³) is the specific density of the aggregate raw material, $V_{lwa,i}$ and V_{CLC} are the volumes of the used LWA in different size ranges and volume of the designed CLC, respectively.

The porosity resulted from the hydration of cement consists of two parts: the capillary porosity and the chemical shrinkage porosity due to cement hydration, which can be described using a model proposed by [31], reads:

$$\varphi_v = \varphi_w + \varphi_s = \frac{\frac{w_0}{c_0} - n \left(\frac{w_d v_d}{v_w c} \right)}{\frac{v_c}{v_w} + \frac{w_0}{c_0}} \quad (3)$$

where φ is the volume fraction, w_0/c_0 is the initial water/cement ratio by mass, c is the hydrated cement content, v_d is the specific volume of the compressed water (here meaning gel water + nonevaporable water), cm³/g; v_c is the specific volume of the cement, cm³/g; v_w is the specific volume of water, cm³/g (here a value of 1.0 cm³/g is used); w_d is the reacted water (g); n is the hydration degree; subscript v is the void fraction; w is the capillary water; and s is the chemical shrinkage. [32] proposed an expression to compute in **Equation 3** under the assumption of congruent hydration, reading

$$\frac{w_d v_d}{v_w c} = 0.284x_{C_3S} + 0.301x_{C_2S} + 1.141x_{C_3A} + 0.387x_{C_4AF} + (0.320\alpha_0 - 0.082)x_{CS} \quad (4)$$

where x is the mass fraction, subscripts C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF, CS are alite, belite, aluminite, ferrite and anhydrite, respectively and α_0 is the degree of carbonation of the monosulfate phase. The mass fraction of the above mentioned five phases are calculated using the Bogue method and the chemical composition of the used cement obtained from the provider ENCI [33] assuming a free lime content of 0.7%, and the results are listed in **Table 5**. The degree of carbonation of the monosulfate phase (α_0) is assumed as zero due to the short curing period of 28 days. Hence is calculated, yielding 0.330.

Therefore the porosity of the designed lightweight composites can be calculated from

$$\varphi_{v,CLC} = \varphi_{v,lwa} + \varphi_{v,paste} \quad (5)$$

where $\varphi_{v,CLC}$ is the porosity of the designed composites, $\varphi_{v,lwa}$ is the porosity contributed by the LWA, and $\varphi_{v,paste}$ is the porosity contributed by the paste, and

(LWA) необходимо введение большого количества тонких фракций для предотвращения расслоения разрабатываемого композита из-за крайне низкой плотности LWA (**табл. 1, см. № 1 (33), 2014**). Поэтому можно ожидать увеличения вязкости смеси по сравнению с обычной самоуплотняющейся бетонной смесью. В настоящей работе в качестве заданных показателей выбраны значения расплыва 300 мм, а время вытекания через V-образную воронку — 9–11 сек.

Для получения этих показателей были проведены пробные эксперименты, в ходе которых незначительно варьировали соотношение твердых компонентов, а также количество СП или объем воды. Было установлено, что максимально эффективное количество СП составляет 1,0 масс. % от содержания цемента. Расплыв конуса при увеличении количества СП с 1,0 до 1,5 масс. % оставался неизменным. Это согласуется с данными работы [11], где сообщается, что, начиная с определенного количества введенного СП (1,5 масс. % от содержания цемента), расплыв конуса самоуплотняющейся смеси не увеличивается. Это означает, что избыток СП не влияет на подвижность, напротив, он может привести к расслоению и замедлению начала схватывания.

Для достижения заданных значений плотности и растекаемости изменялся расход воды. При увеличении B/C с 0,45 до 0,60 при постоянном количестве СП (1,0% от массы цемента) расплыв конуса увеличивался с 250 до 300 мм, а время вытекания через V-образную воронку уменьшалось с 11 до 6 сек. В итоге для смеси SCLC1 было выбрано значение $B/C = 0,59$. При увеличении B/C с 0,51 до 0,60 при том же постоянном количестве СП расплыв увеличивался с 300 до 340 мм, а время вытекания через V-воронку уменьшалось с 16 до 10 сек. По результатам измерений для смеси SCLC2 было выбрано значение $B/C = 0,54$.

Для самоуплотняющейся растворной смеси на плотных заполнителях указывалось время вытекания через V-образную воронку от 4 до 6 сек, при этом также отмечалось, что ее закупоривание происходило уже спустя 7,5 сек, что заметно меньше показателя, достигнутого в настоящем исследовании, особенно для смеси SCLC2 [11]. Это можно объяснить большим количеством мелких фракций, используемых в этих двух смесях, по сравнению с их содержанием в обычной самоуплотняющейся смеси [11]. Тем более, что при подборе состава смеси SCLC2 был принят модуль распределения 0,25, который приводит к еще более высокому по сравнению со смесью SCLC1 содержанию известняковой муки (**табл. 4**). Однако использование такого большого количества тонких фракций необходимо для предотвращения расслоения смеси.

Table 5. Composition of the used CEM I 52.5 N

Таблица 5. Состав CEM I 52.5 N

Cement type // Тип цемента	x_{C_3S}	x_{C_2S}	x_{C_3A}	x_{C_4AF}	x_{CS}
CEM I 52.5 N	0.571	0.142	0.082	0.091	0.039

The results are listed in **Table 6**. Here the hydration degree is assumed as 0.7 based on a curing age of 28 days [15].

The porosity of the designed *CLC* is measured applying the vacuum-saturation technique, i. e. to saturate the accessible pores with water, as this method is referred to as the most efficient saturation method [34]. Samples with a format of a disc (with a height of 10–15 mm and a diameter of 100 mm) are extracted from the inner layer of three 150 mm cubes for each prepared composite. The test is carried out on three samples for each mix, following the standards [35, 36].

The results are listed in **Table 7**. It can be seen that all the values are larger compared to conventional concrete, for instance [35] reported a porosity of 20.5% of the concrete produced with a water/cement ratio of 0.60 employing the same measurement method, i. e. vacuum-saturation technique. This is attributed to the large internal porosity of the *LWA*. Although the external shell of the used *LWA* is rather closed and impermeable, it still contains some interconnected openings (**Fig. 2**), through which liquids can enter the aggregates. The inflow of water into the *LWA* is even more efficient during the vacuum-saturation process, however there is also a risk that the applied low pressure will damage the outer shells of the aggregates, exposing closed pores and increasing the real permeable porosity.

The measured water permeable porosities are similar for the two self-compacting composites, 34.31 and 34.97% in average for *SCLC1* and *SCLC2* respectively; while for the *VCLC* it is slightly lower, 30.65% in average, as shown in **Table 7**. Nevertheless, all the measured values of the permeable porosities are smaller than the calculated corresponding values, as listed in **Table 6**. This indicates that some of the pores in the used *LWA* are closed and not accessible to water transport.

It is shown in **Table 6** that both *SCLC1* and *SCLC2* have similar porosities contributed by the paste due to the similar water/cement ratios used in these two mixes, while the calculated total porosity of *SCLC1* is larger than

Table 6. Theoretical porosity of the designed *CLC**

Таблица 6. Теоретическая пористость разработанных *CLC**

Mix // Смесь	$\phi_{v,LWA}$, %	ϕ_v , %	ϕ_{paste} , %	$\phi_{v,CLC}$ %
SCLC1	32.23	39.71	0.385	47.50
SCLC2	25.25	36.18	0.363	38.40
VCLC	35.76	21.47	0.291	42.01

Note: ϕ_{paste} is calculated from the paste volumetric proportion in the mix design

Примечание: ϕ_{paste} рассчитывается из объемной доли теста в составе смеси.

В случае *VCLC* использовались две заданные величины — плотность и расплыв конуса, определяемый методом встряхивающего столика. Плотность была выбрана равной плотностью *SCLC2*, чтобы иметь возможность сравнивать их показатели в затвердевшем состоянии. Для достижения заданного значения расплыва (150 мм) образцы с разными значениями *В/Ц* и количества СП испытывались при помощи теста на расплыв с использованием конуса Хегерманна и встряхивающего столика (15 встряхиваний). На основании этих измерений выбрано окончательное значение *В/Ц*, равное 0,38, и количество СП — 0,8% от массы цемента.

3.1.2 Пористость

Разрабатываемый композит состоит из легких заполнителей, цементного теста, инертного наполнителя и воздуха. Его пористость определяется внутренней пористостью *LWA* и пористостью цементного теста. Ранее было установлено, что при насыщении легкого заполнителя водой в его межфазной переходной зоне (МПЗ) образуется оболочка из воздушных пузырьков [15]. Однако, как представляется, в данном случае этого не происходит, что будет проанализировано позднее. Таким образом, в нашем случае пористость МПЗ в композите предполагается крайне низкой и не принимается в расчет.

Table 7. Porosity results measured using vacuum-saturation method

Таблица 7. Результаты по расчету пористости, полученные с применением метода вакуумного насыщения

Mix // Смесь	Sample number // Номер образца	m_s , g // г	m_w , g // г	m_d , g // г	Porosity // Пористость $\phi_{v,water}$, %	Average // Среднее значение $\phi_{v,water}$ (st. dev. // ст. откл.), %
SCLC1	1	140.78	56.74	111.42	34.94	34.31 (1.62)
	2	140.90	53.45	109.84	35.52	
	3	137.00	49.97	108.74	32.47	
SCLC2	1	180.28	81.72	145.37	35.42	34.97 (2.05)
	2	199.51	101.32	167.38	32.72	
	3	187.37	88.77	151.13	36.75	
VCLC	1	168.29	71.87	138.95	30.43	30.65 (0.26)
	2	168.61	72.72	138.94	30.94	
	3	172.67	74.86	142.75	30.59	

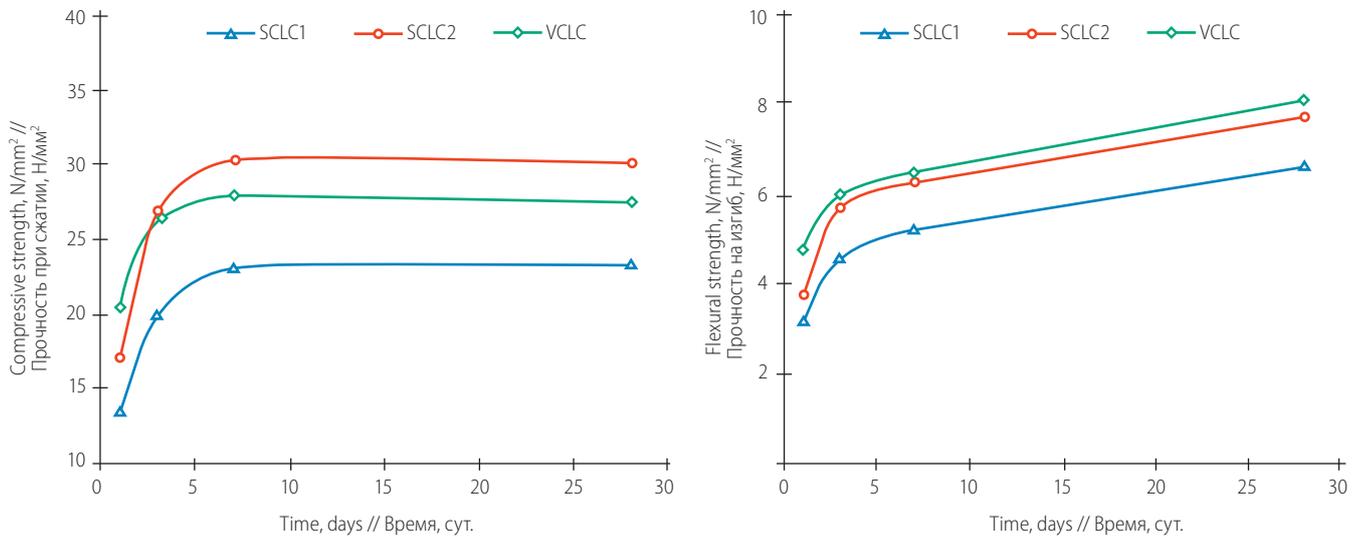


Fig. 11. Strength of the CLC: a) compressive strength; b) flexural strength
 Рис. 11. Прочность ЦЛК: а) прочность на сжатие; б) прочность на изгиб

SCLC2. However, their measured water permeable porosities are similar. As can be seen from Table 4, 82.90 dm³ LWA with the size of 0.25–0.5 mm are used in mix SCLC1 while zero in mix SCLC2, besides a similar amount of the used LWA in the fractions of 0.5–1 mm and 1–2 mm in both SCLC, which results in the porosity difference of these two SCLC. This indicates that the used LWA with the size of 0.25–0.5 mm is quite water impermeable, and the pores inside the particles are mostly closed pores, and this is in line with the low water absorption [6]. Another possible reason is attributed to the larger amount of the LWA 0.1–0.3 used in mix SCLC2. It can be seen that the particle sizes of fraction LWA 0.1–0.3 are very small (40% of the particles are smaller than 125 μm), which creates more chances to be interconnected through the permeable paste.

The measured water-permeable porosity of VCLC is the smallest for all three mixes, which can also be explained by the mix design. As shown in Table 4, only fractions of LWA with the larger size of 1–2 mm and 2–4 mm are used in the VCLC. Therefore the interconnection possibilities between particles are reduced to some extent, and besides the water transport route is reduced also due to the small capillary porosity of the paste (Table 6).

3.1.3 Mechanical properties

Fig. 11 shows the compressive and flexural strength development of the lightweight aggregates composites as a function of the curing age. All these three mixes have a similar feature of a quite fast early stage strength development. The compressive strength of the mixes SCLC1 and SCLC2 after 24 hours curing reaches 58.8 and 57.1% of their compressive strength at 28 days, respectively, while the compressive strength of VCLC reaches even 74.5% of its value at 28 days after 24 hours curing.

Внутренняя пористость LWA рассчитывается по формуле:

$$\varphi_{v,lwa} = \sum_{i=1}^n \varphi_{v,lwa,i} \times \varphi_{lwa,i} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{V_{lwa,i}}{V_{CLC}} \times \left(1 - \frac{\rho_{lwa,i}}{\rho_{slwa}} \right) \right] \quad (2)$$

где $\varphi_{v,lwa}$ — пористость, формируемая за счет введения LWA; $\rho_{lwa,i}$ (г/см³) — теоретическая плотность частиц легкого заполнителя во фракции i ; ρ_{slwa} (г/см³) — удельная плотность исходного сырья наполнителя, $V_{lwa,i}$ и V_{CLC} — объемы использованного LWA и разрабатываемого композита соответственно.

Пористость, сформированная в процессе гидратации цемента, определяется двумя составляющими — капиллярной пористостью и пористостью, возникающей вследствие химической усадки при гидратации цемента; ее можно описать по модели, предложенной в [31], следующим образом:

$$\varphi_v = \varphi_w + \varphi_s = \frac{\frac{w_0}{c_0} - n \left(\frac{w_d v_d}{v_w c} \right)}{\frac{v_c}{v_w} + \frac{w_0}{c_0}} \quad (3)$$

где φ — объемная доля; w_0/c_0 — начальное В/Ц по массе; c — количество гидратированного цемента, v_d — удельный объем связанной воды (в данном случае это означает воду геля + неиспаряемую воду), см³/г; v_c — удельный объем цемента, см³/г; v_w — удельный объем воды (в данном случае используется значение 1,0 см³/г), см³/г; w_d — прореагировавшая вода, г; n — степень гидратации, индекс v — поры, индекс w — капиллярная вода, s — химическая усадка. Была предложена формула для подстановки в уравнение 3, разработанная на основе предположения об определенном механизме гидратации, а именно [32]:

$$\frac{w_d v_d}{v_w c} = 0.284x_{c_3s} + 0.301x_{c_2s} + 1.141x_{c_1s} + 0.387x_{c_1AF} + (0.320\alpha_0 - 0.082)x_{c_3\bar{s}} \quad (4)$$

The compressive strength of all the three mixes already reaches the maximum value at the age of only 7 days, as can be seen in Fig. 11a. This is confirmed by [17], who observed very similar phenomena using the same type of expanded glass as aggregates. A statistic comparison of the strength development of the lightweight concrete containing different types of LWA is presented here, and the results are shown in Fig. 12.

It is clearly shown that the lightweight concrete, although produced from different types of LWA, has the similarity of fast strength development at early ages, especially in the case of the compressive strength at 28 days of lightweight concrete being lower than 30 N/mm². This probably can be attributed to the effect of the lightweight aggregates, i. e. the compressive strength of the lightweight composites is dominated by the strength of the used LWA and not the strength of the cement matrix anymore. This is also confirmed by the flexural strength results, as shown in Fig. 11b. It clearly shows that the flexural strength of the three mixes is continuously increasing until the age of 28 days, which indicates that the hydration process is still progressing although the compressive strength remains constant.

3.1.4 Thermal properties

Thermal behavior is a key factor in the development and application of lightweight concrete. The thermal behavior of lightweight aggregates concrete is related to its thermal conductivity and its density, which in turn is influenced by its pore structure, i. e. the air-void system, aggregates and the matrix [15].

The thermal conductivities of the three developed mixes are measured using the same heat transfer analyzer (ISOMET Model 2104). Here the samples are first dried in an oven at 105 °C until the mass becomes constant, and then cooled down to room temperature for executing the thermal conductivity measurement. The average results are listed in Table 8.

3.2 Comparative study

3.2.1 Water demand

The water demand determination of powders is essential in designing concrete especially with self-compacting features [11]. The water demand of both β -hemihydrate and cement can be performed by using the same mini-slump flow test. The investigated β -hemihydrate has a much larger water demand compared to that of cement CEM I 52.5, which is caused by the large difference between their specific surface areas (BET surface area of β -hemihydrate is 7.5 m²/g compared to CEM I 52.5 N of 0.9 m²/g). The larger water demand of β -hemihydrate leads to a large difference between the calcium sulphate-based composite and the cement-based composite design.

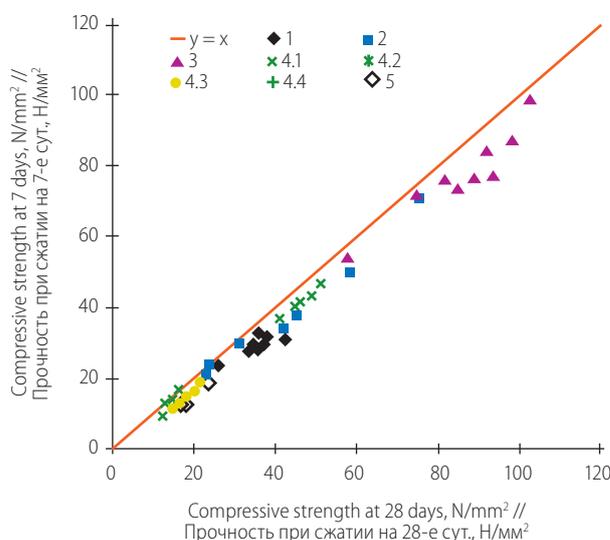


Fig. 12. Strength comparison between the age of 7 days and 28 days of lightweight concrete using different types of LWA: 1) Expanded clay [15]; 2) Expanded clay [17]; 3) Expanded clay [18]; 4.1) Recycled stone [37]; 4.2) Pumice [37]; 4.3) Tuff [37]; 4.4) Diatomite [37]; 5) Expanded polystyrene [38]

Рис. 12. Сравнение прочности легкого бетона, содержащего различные виды легких заполнителей, в возрасте 7 и 28 сут.: 1) керамзит [15]; 2) керамзит [17]; 3) керамзит [18]; 4.1) переработанный камень [37]; 4.2) пемза [37]; 4.3) туф [37]; 4.4) диатомит [37]; 5) пенополистирол [38]

где x — массовая доля; индексы C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , CS означают соответственно алит, белит, алюминат, феррит и ангидрит; α_0 — степень карбонизации моносulfатной фазы. Массовая доля указанных выше пяти фаз рассчитывалась по методу Богью, а минеральный состав используемого цемента был предоставлен его поставщиком — компанией ENCI [33] с предположением, что доля свободного оксида кальция равна 0,7%. Результаты представлены в табл. 5. Степень карбонизации моносulfатной фазы (α_0) была принята равной нулю из-за короткого времени выдерживания — 28 сут. Таким образом, в результате расчетов получили значение 0,330.

С учетом вышесказанного пористость разработанных легких композитов можно рассчитать по формуле

$$\varphi_{v,CLC} = \varphi_{v,lwa} + \varphi_{v,paste} \quad (5)$$

где $\varphi_{v,CLC}$ — пористость разработанных композитов, $\varphi_{v,lwa}$ — пористость, формируемая за счет введения LWA; $\varphi_{v,paste}$ — пористость цементного теста. Результаты расчетов представлены в табл. 6. Для возраста 28 сут. степень гидратации принимается равной 0,7 [15].

Пористость разработанных легких композитов измерялась с применением метода вакуумного насыщения, т. е. насыщения свободных пор водой, так как этот метод признан наиболее эффективным [34]. Для каждого исследуемого бетона из трех кубов

3.2.2 Density and porosity

Fig. 13 shows the porosity of both *SGLC* and *CLC* versus density. It is obviously shown that the porosity and density of both *SGCL* and *CLC* follow the same rule, although the values of each material are in different ranges. This probably can be explained by the same mix design method, and the same type of the used *LWA*.

3.2.3 Strength and density

Fig. 14 shows the results of the compressive strength plotted against the density of *SGLC* and *CLC*. Surprisingly, these two composites have the same power law between the compressive strength and the density. This finding is very interesting, from here it can be concluded that the *SLGC* can have a much better strength when its porosity can be reduced. This means a proper design, implying more efficient *SP* dosage, should be taken into account.

3.2.4 Thermal conductivity and density

Fig. 15 shows the relation between the thermal conductivity and density of both *SGLC* and *CLC*. It shows that the exponential relation between the thermal conductivity and the density in the case of both composites still hold. Nevertheless the deviation is larger, compared to the porosity and strength and density, as indicated from the coefficient of determination shown in **Fig. 6, 15**. This also confirms the analysis in the previous sections that the thermal conductivity is complicatedly related to not only the density, but also many other factors.

3.2.5 Discussion

The above sections analyzed the *SGLC* and *CLC* in terms of both fresh behavior of cement and β -hemihydrate and the properties of *SGLC* and *CLC* in their hardened state, including density/porosity, strength and thermal conductivity.

Results show that, despite the clear difference between the used binders, β -hemihydrate and cement, in *SGLC* and *CLC*, the two composites have quite similar characteristics between the density and other properties including porosity, strength and thermal conductivity. This generates an idea of using β -hemihydrate as binder to produce high strength composites in order to replace concrete to some extent, for example to be used as structural material in indoor conditions. But, as discussed before, the large porosity of the composite caused by the large water demand of β -hemihydrate is a challenge that should be overcome.

Conclusions

The present paper addresses the design of lightweight aggregates composites applying separately cement

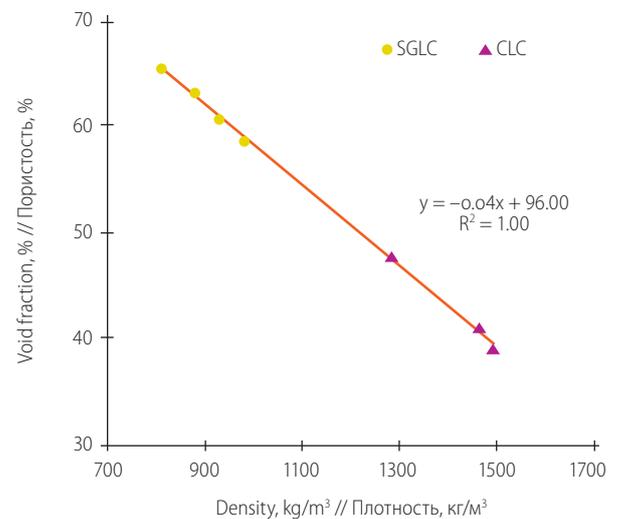


Fig. 13. Porosity of SGLC and CLC versus density
Рис. 13. Зависимость пористости SGLC и CLC от плотности

со стороной 150 мм были вырезаны образцы, имеющие форму диска (высотой 10–15 мм и диаметром не менее 100 мм). Для каждого вида бетона испытания проводились на трех образцах в соответствии со стандартами [35, 36].

Результаты представлены в **табл. 7**, из которой видно, что все показатели превышают показатели обычного бетона, так например, в работе [35] для бетона с *В/Ц*, равным 0,60, при использовании того же метода вакуумного насыщения, указано значение пористости 20,5%. Рост показателей связан с высокой пористостью *LWA*. Несмотря на значительную закрытость и непроницаемость внешней оболочки гранул используемого *LWA*, они тем не менее содержат некоторое количество взаимосвязанных пор (**рис. 2**), через которые в заполнитель может проникать жидкость. В процессе вакуумного

Table 8. Thermo physical properties of the lightweight aggregates composites

Таблица 8. Теплофизические свойства композитов на легких заполнителях

Mix // Смесь	Density, kg/m ³ // Плотность, кг/м ³	Thermal conductivity, W/m K // Теплопроводность, Вт/м К
SCLC1	1280	0.485
SCLC2	1460	0.738
VCLC	1490	0.847
Reference // Эталон	2300	1.700

Note: reference self-compacting concrete prepared with normal weight aggregates

Примечание: в качестве эталона выбран самоуплотняющийся бетон, изготовленный с использованием обычных заполнителей.

and calcium sulphate hemihydrate as binders, in order to deep understanding their roles as the binder. A mix design methodology is applied for this purpose. The developed composites are investigated in terms of their both fresh and hardened states behaviour. A comparative study on cement or calcium sulphate as binder is presented. The following conclusions can be drawn:

- ▷ A mix design methodology, originally developed for concrete mix design, is employed; and several mixes of gypsum/cement based composites with light-weight aggregates are designed using different distribution moduli q ;
- ▷ The fresh behaviour of these mixes is investigated. An effective maximum superplasticizer dosage is found; beyond this maximum value the flowability remains constant when the SP content is further increased.
- ▷ The density as well as the void fraction of the developed composite in its hardened state is studied by both modelling and experiments; a relation between the void fraction and the density is found;
- ▷ The mechanical properties of the new composite are investigated, a comparative study on strength is performed on the composite and traditional gypsum board; and the effect of the applied distribution moduli on the strength is discussed;
- ▷ The thermal physical properties of the new composite are investigated. The effect of the used distribution moduli is analyzed; a link between the density and the thermal properties is derived;
- ▷ Composite produced using β -hemihydrate as binder has similar characteristics as the present CLC ; for example, their porosity, compressive strength and thermal conductivity follow similar rules as density; this indicates an ample room for the application of calcium sulphate as binder to produce load bearing composites to replace concrete in some extent. ◀

References // Литература

1. Hüsken, G. (2010). A multifunctional design approach for sustainable concrete, with application to concrete mass products. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands.
2. Wirsching, F. (2005). Calcium Sulfate. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
3. Ryan, J. V. (1962). Study of gypsum plasters exposed to fire. Journal of Research of the National Bureau of Standards — C. Engineering and Instrumentation 66c: 373–387.
4. Yu, Q. L. (2012). Design of environmentally friendly calcium sulfate-based building materials. Towards and improved indoor air quality. PhD thesis. Eindhoven University of Technology, the Netherlands.

насыщения фильтрация воды в LWA происходит даже более эффективно, однако существует также вероятность того, что создание вакуумной среды разрушает внешние оболочки гранул заполнителя, открывая закрытые прежде поры и повышая реальное значение пористости.

Измеренная по водопроницаемости пористость имеет близкие значения для двух самоуплотняющихся композитов — в среднем 34,31 и 34,97% для SCLC1 и SCLC2 соответственно; для VCLC значение несколько ниже, в среднем 30,65%, (табл. 7). Тем не менее все значения пористости, измеренной по водопроницаемости, меньше, чем соответствующие расчетные значения, приведенные в табл. 6. Это указывает на то, что некоторые поры в использовавшихся LWA закрыты и через них невозможна фильтрация воды.

В табл. 6 показано, что SCLC1 и SCLC2 имеют близкие по значению величины пористости цементного теста, по причине близких значений V/C этих двух смесей, в то время как общая расчетная пористость у SCLC1 выше, чем у SCLC2. Однако определенные экспериментальные значения пористости по водопроницаемости у них близки. Как можно видеть из табл. 4, в смеси SCLC1 использовано 82,90 дм³ LWA размером 0,25–0,5 мм, а в смеси SCLC2 эта фракция LWA не используется; при этом в обе смеси SCLC вводится примерно равное количество фракций LWA 0,5–1 мм и 1–2 мм. Это означает, что LWA размером 0,25–0,5 мм является в достаточной мере водонепроницаемым, так как поры внутри этих частиц в основном остаются закрытыми, что хорошо согласуется с низким значением водопоглощения для SCLC1 [6]. Другая возможная причина связана с более значительным количеством LWA размером 0,1–0,3 мм в смеси SCLC2. Размеры частиц фракции LWA 0,1–0,3 мм очень малы (40% из них имеют размер менее 125 мкр), что обеспечивает больше возможностей для образования внутренних связей в цементной матрице.

Значение пористости, измеренной по водопроницаемости, для VCLC является наименьшим для трех смесей, что также можно объяснить составом смеси. Как показано в табл. 4, в VCLC использованы только фракции LWA более крупного размера — 1–2 мм и 2–4 мм. Поэтому возможности для внутренней связи между частицами заметно снижены. Кроме того, фильтрация воды затруднена из-за низкой капиллярной пористости цементного камня (табл. 6).

3.1.3 Механические показатели

На рис. 11 показана зависимость прочности LWA при сжатии и изгибе от времени. Все три смеси набирают прочность достаточно быстро. Прочность при сжатии SCLC1 и SCLC2 на первые сутки составляет соответственно 58,8 и 57,1% от 28-суточной, в то время как прочность при сжатии VCLC на первые сутки достигает даже 74,5% от ее значения в возрасте 28 сут.

5. Andreasen, A. H. M., and Andersen, J. (1930). Ueber die Beziehungen zwischen Kornabstufungen und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). *Kolloid-Zeitschrift* 50: 217–228 (In German).
6. Yu, Q. L. (2012). Design of environmentally friendly calcium sulfate-based building materials. Towards and improved indoor air quality. PhD thesis. Eindhoven University of Technology, the Netherlands.
7. Funk, J. E., and Dinger, D. R. (1994). Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing, Kluwer Academic Publishers, U. S. A..
8. Villar, J., and Baret, J. F. (2002). Cementing slurry and method of designing a formulation. U. S. Patent No. 6153562.
9. Brouwers, H. J. H. (2006). Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings, *Physical review E*, 74 (2006) 031309.
10. Brouwers, H. J. H., and Radix, H. J. (2005). Self-compacting concrete: theoretical and experimental study, *Cement and Concrete Research* 35: 2116–2136.
11. Hunger M. (2010). An integral design concept for ecological self-compacting concrete. PhD thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands.
12. Hüsken, G., and Brouwers, H. J. H. (2008). A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. *Cement and Concrete Research* 38: 1246–1259.
13. Yu, Q. L., and Brouwers, H. J. H. (2012b). The development of self-compacting gypsum based lightweight composite: a theoretical and experimental investigation. *Cement and Concrete Composite*, 34: 1033–1043.
14. Yu, Q. L., and Brouwers, H. J. H. (2012a). Thermal properties and microstructure of gypsum board and its dehydration products: a theoretical and experimental investigation. *Fire and Materials*, 36: 575–589.
15. Chandra, S., and Berntsson, L. (2003). Lightweight aggregate concrete science, technology and applications, Standard publishers distributors. Delhi, India.
16. EuroLightCon (1998). LWAC material properties state-of-the-art. In: Economic design and construction with light weight aggregate concrete.
17. Liu, X., Chia, K. S., and Zhang, M. H. (2010). Development of lightweight concrete with high

Прочность при сжатии всех трех составов достигает максимального значения уже на 7-е сут. (**рис. 11а**). Это подтверждается в работе [17], где были зафиксированы аналогичные результаты при использовании сходного по структуре заполнителя — пено-стекла. В настоящей работе представлено сравнение данных по набору прочности бетонами, изготовленными на легких заполнителях разного типа (**рис. 12**).

Легко заметить, что хотя бетоны изготавливаются на разных наполнителях, они набирают прочность одинаково рано, особенно когда прочность при сжатии в возрасте 28 сут. не превышает 30 Н/мм². Это может быть связано с влиянием LWA, т.е. прочность при сжатии легких композитов в первую очередь определяется прочностью используемых заполнителей, а не прочностью цементного камня. Такое предположение также подтверждается результатами измерений прочности при изгибе (**рис. 11б**). Легко заметить, что прочность при изгибе для трех исследуемых составов постоянно растет в течение 28 сут., что указывает на то, что процесс гидратации продолжается даже после достижения постоянного значения прочности при сжатии.

3.1.4 Теплофизические свойства

Теплофизические свойства являются основными показателями при изучении, разработке и применении легких бетонов. Для бетона на легких заполнителях характерны низкие показатели теплопроводности и плотности, на которые оказывает влияние пористая структура — система состоящая из цементной матрицы, заполнителей и воздушных пор [15].

Теплопроводность трех разработанных смесей была измерена с помощью промышленного анализатора теплопередачи (ISOMET, модель 2104). Для этого образцы сначала высушивались в печи при 105 °С до достижения постоянной массы, а затем охлаждались до комнатной температуры. Средние результаты приведены в **табл. 8**.

3.2 Сравнительное исследование

3.2.1 Водопотребность

Определение водопотребности сухой смеси является ключевым при подборе состава бетонной смеси, особенно самоуплотняющейся [11]. Водопотребность как β -полуhydrата, так и цемента можно определить с помощью мини-теста на растекаемость. Исследуемый β -полуhydrат имеет значительно большую водопотребность по сравнению с цементом СЕМ I 52.5, что объясняется заметной разницей их удельных площадей поверхности (площадь поверхности β -полуhydrата, рассчитанная по теории БЭТ — 7,5 м²/г, СЕМ I 52.5 N — 0,9 м²/г). Более высокая водопотребность β -полуhydrата приводит к заметным различиям в показателях легких композитов

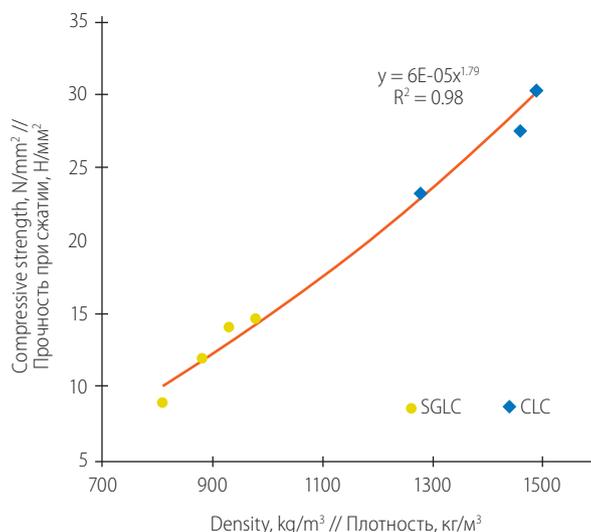


Fig. 14. Compressive strength of SGLC and CLC versus density.
Рис. 14. Зависимость прочности при сжатии SGLC и CLC от плотности

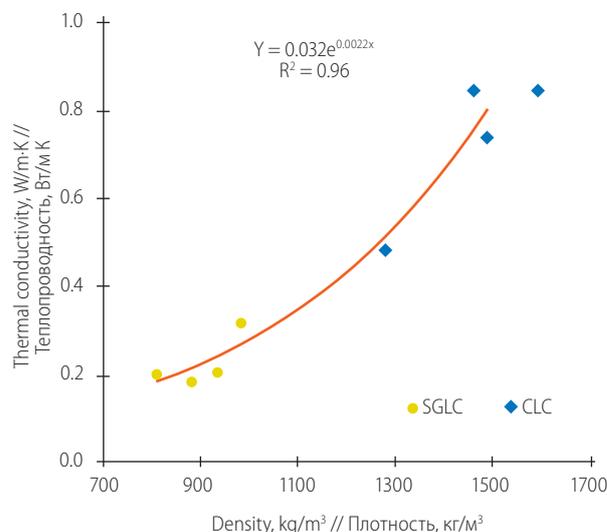


Fig. 15. Thermal conductivity of SGLC and CLC versus density
Рис. 15. Зависимость теплопроводности SGLC и CLC от плотности

resistance to water and chloride-ion penetration, Cement & Concrete Composites 32: 757–766.

18. Zhang, M. H., and Gjorv, O. E. (1991). Mechanical properties of high-strength lightweight concrete, ACI Mater. J. 88: 240–247.
19. EFNARC (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC, 2002.
20. Yu, Q. L., and Brouwers, H. J. H. (2011b). Self-compacting gypsum based light-weight composite: theoretical and experimental study. Proceedings 1st Weimarer Gipstagung Eds. H. B. Fischer, Chr. Mattes and C. Beuthan, F. A. Finger-Institut fur Baustoffkunde, Weimar, Germany, 1: 251–259.
21. Yu, Q. L., and Brouwers, H. J. H. (2011a). Microstructure and mechanical properties of β -hemihydrate produced gypsum: an insight from its hydration process. Construction and Building Materials 25: 3149–3157.
22. Hampel, C. (2010). Polymer 1* or 2* produced in full production scale (about 3 tons) for extended production tests of gypsum plasterboards. EU Project I-SSB report.
23. Zehner, P., Schlunder, E. U. (1970). Thermal conductivity of granular materials at moderate temperatures. Chemie Ingenieur Technik 42 (14): 933–941.
24. Somerton, W. H., Chu, S. L. and Keese, J. A. (1974). Thermal behavior of unconsolidated oil sands. Society of Petroleum Engineers of AIME Journal 14: 513–521.

на основе сульфата кальция (SGLC) и на основе цемента (CLC).

3.2.2 Плотность и пористость

На рис. 13 показана зависимость пористости SGLC и CLC от плотности. Очевидно, что пористость и плотность как SGLC, так и CLC подчиняются одному и тому же закону, хотя значения для каждого материала лежат в разных диапазонах. Это можно объяснить тем, что для приготовления смесей использовался один и тот же метод и тот же самый легкий наполнитель.

3.2.3 Прочность и плотность

На рис. 14 показана зависимость прочности при сжатии от плотности SGLC и CLC. Интересно, что эти два композита имеют одинаковый характер экспоненциальной зависимости прочности при сжатии от плотности. Это наблюдение представляется очень любопытным, так как отсюда следует вывод, что SGLC может иметь значительно более высокую прочность при снижении его пористости. Это означает необходимость соответствующих исследований, включая подбор более оптимального количества вводимого СП.

3.2.4 Теплопроводность и плотность

На рис. 15 показано соотношение между теплопроводностью и плотностью SGLC и CLC. Показано, что между этими показателями для обоих композитов сохраняется экспоненциальная зависимость. Тем не менее различия по сравнению с зависимостью пористости, прочности и плотности становятся

25. De Korte, A. C. J., and Brouwers, H. J. H. (2010). Calculation of thermal conductivity of gypsum plasterboards at ambient and elevated temperature. *Fire and Materials* 34: 55–75.
26. Tregger, N., Ferrara, L., and Shah, S. P. (2008). Identifying viscosity of cement paste from mini-slump-flow test. *ACI Materials Journal* 558–566.
27. EFNARC (2005). The European guidelines for self-compacting concrete. Specification, production and use. EFNARC.
28. Walraven, J. C., Takada, K., and Pelova, G. I. (1999). Zelfverdichtend beton, hoe maak je dat? *Cement* 3: 68–72 (in Dutch).
29. Ankone, S. F. A. (2000). Zelfverdichtend beton. Training period report. University of Twente, the Netherlands (in Dutch).
30. BFBN (2001). *Cursushandboek Zelfverdichtend Beton*. Bond van Fabrikanten van Betonproducten in Nederland (BFBN), Woerden, the Netherlands (in Dutch).
31. Brouwers, H. J. H. (2004). The work of Powers and Brownyard revisited: part 1. *Cement and Concrete Research* 34: 1697–1716.
32. Brouwers, H. J. H. (2011). A hydration model of Portland cement using the work of Powers and Brownyard. Eindhoven University of Technology & Portland Cement Association. ISBN: 978-90-6814-184-9. Available on www.cement.org.
33. Hunger, M. (2012). Personal communication.
34. Safiuddin, Md., and Hearn, N. (2005). Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete. *Cement and Concrete Research* 35: 1008–1013.
35. NT Build 492 (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Nord test method. Finland.
36. ASTM C1202 (2005). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. In *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
37. Topcu, I. B., and Uygunoglu, T. (2010). Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). *Construction and Building Materials* 24: 1286–1295.
38. Kan, A., and Demirboga, R. (2009). A novel material for lightweight concrete production. *Cement & Concrete Composites* 31: 489–495.

заметнее, что согласуется с коэффициентами корреляции, приведенными на **рис. 6** (см. №1 (33), 2014) и **рис. 15**. Это также подтверждает выводы, сделанные в предыдущих разделах о сложной связи теплопроводности не только с плотностью, но и со многими другими факторами.

3.2.5 Обсуждение

В предыдущих разделах показатели разработанных составов SGLC (на основе β -полугидрата) и CLC (на основе цемента) исследовались на ранних и поздних стадиях твердения. Измерялись плотность, пористость, прочность и теплопроводность.

Результаты продемонстрировали, что, несмотря на явные различия между использованными вяжущими, β -полугидратом и цементом, в SGLC и CLC два композита имеют достаточно близкие характеристики зависимости плотности, пористости, прочности и теплопроводности. Этот вывод стал основой для идеи применения β -полугидрата в качестве вяжущего при производстве высокопрочных композитов для частичной замены бетона, например в качестве материала для внутренних несущих конструкций. Однако, как обсуждалось ранее, большая пористость композита, вызванная высокой водопотребностью β -полугидрата остается проблемой, требующей решения.

Выводы

Настоящая статья посвящена созданию легких композитов на основе цемента и на основе полугидрата сульфата кальция для более глубокого понимания их роли в качестве вяжущих. Для этой цели применялась методология подбора состава смеси. Исследовано поведение разработанных композитов в виде растворной смеси и затвердевших образцов. Представлено сравнительное исследование использования цемента или сульфата кальция в качестве вяжущего. Можно сделать следующие выводы:

- Использована методология создания смеси, изначально разработанная для производства обычной бетонной смеси. С применением различных модулей распределения q разработаны несколько составов легких композитов на основе гипса и цемента.
- Исследовано поведение данных смесей в виде растворной смеси. Найдена эффективная максимальная дозировка суперпластификатора; при превышении этого значения дальнейшее увеличение содержания СП не влияет на подвижность смеси.
- С помощью расчетного моделирования и практических опытов исследованы плотность и пористость разработанного композита; найдена зависимость между ними.
- Исследованы механические показатели нового композита, выполнено сравнительное

исследование прочности композита и традиционного гипсокартона, обсуждено влияние применяемых модулей распределения на прочность.

- ▷ Исследованы теплофизические свойства нового композита. Проанализировано влияние применяемых модулей распределения; установлена связь между плотностью и теплофизическими свойствами.
- ▷ Композит, полученный с применением β -полугидрата в качестве вяжущего, имеет характеристики, близкие к обычному бетону; в частности, их пористость, прочность при сжатии и теплопроводность подчиняются тем же закономерностям, что и плотность; это указывает на возможность применения сульфата кальция в качестве вяжущего при производстве композитов для несущих конструкций, которые могут в определенной степени заменить изделия из бетона. ◀

ACKNOWLEDGEMENTS // БЛАГОДАРНОСТИ

The authors wish to express their gratitude to the following sponsors of the Building Materials research group at TU Eindhoven: Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud, Graniet-Import Benelux, Kijlstra Betonmortel, Struyk Verwo, Attero, Enci, Provincie Overijssel, Rijkswaterstaat Zee en Delta — District Noord, Van Gansewinkel Minerals, BTE, Alvon Bouwsystemen, V. d. Bosch Beton, Selor, Twee “R” Recycling, GMB, Schenk Concrete Consultancy, Geochem Research, Icopal, BN International, APP All Remove, Consensor, Eltomation, Knauf Gips, Hess AAC Systems, Kronos and Joma (in chronological order of joining).

