

Dr inż. Lucyna Domagała

Katedra Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli

Wpływ wstępnej wilgotności kruszyw lekkich na nasiąkliwość betonu

The influence of initial moisture of lightweight aggregate on water absorption of concrete

1. Wprowadzenie

Duża nasiąkliwość kruszyw lekkich, przekraczająca nawet 40%, jest z reguły traktowana jako bardzo niekorzystna właściwość, która może prowadzić do znacznego spadku urabialności mieszanki betonowej. Zjawisko to ma niekorzystny wpływ na technologię wykonania betonów lekkich, powodując większe zużycie cementu oraz domieszek upłynniających i konieczność odpowiedniego przygotowania kruszywa przed jego zastosowaniem do produkcji. W celu zmniejszenia wchłaniania wody i zaczynu z mieszanki betonowej, kruszywa porowate poddaje się wstępnej impregnacji (np. polimerami, kerozyną, parafiną, zaczynem cementowym), lub nawilżeniu wodą. Ta ostatnia metoda, z uwagi na łatwość realizacji oraz znacznie niższy koszt, jest zalecana w wytycznych do wykonywania betonów lekkich obowiązujących w wielu krajach, w tym również w Polsce. Ilość wody wchłoniętej przez kruszywo porowate w pierwszych minutach nasączenia wynosi z reguły od 50 do 90% jej wartości maksymalnej. Najczęściej jako poziom wstępnego nawilżenia kruszyw porowatych przyjmuje się więc ich nasiąkliwość w wodzie po 30÷60 minutach. Dla większości kruszyw lekkich wchłanianie wody z mieszanki betonowej po tym okresie ulega znacznemu zmniejszeniu i nie ma już większego wpływu na utratę urabialności. Jednak w przypadku kruszyw charakteryzujących się mniejszą szybkością nasiąkania, jak również w przypadku betonu towarowego, lub przewidzianego do transportu pompowego, wstępne nawilżenie prowadzi się do znacznie wyższego poziomu wilgotności, na przykład odpowiadającej nasiąkliwości po 24 godzinach, czy nawet do pełnego nasycenia wodą.

Powszechnie zalecane wstępne nawilżanie kruszyw lekkich, stosowane praktycznie wyłącznie ze względu na wpływ na urabialność mieszanki betonowej, nie pozostaje jednak bez znaczenia dla późniejszych właściwości betonu dojrzałego, a w szczególności dla jego trwałości. Wchłanianie przez kruszywo porowate wody z mieszanki betonowej, powoduje zmniejszenie zawartości wody w otaczającej ziarna matrycy cementowej, co sprzyja wzrostowi jej szczelności i wytrzymałości. W technologii betonów lekkich przyjmuje się, że matrycę cementową stanowi zaczyn, w przypadku gdy kruszywo drobne jest również kruszywem lekkim, lub za-

1. Introduction

High water absorption of lightweight aggregate, even up to 40%, is usually regarded as an extremely negative property, which may lead to considerable slump loss of concrete mixture. In this respect, water absorption of porous aggregate hinders production technology of lightweight concrete to a large extent, resulting in higher cement share and admixture addition and/or necessity of suitable aggregate treatment prior to its application in concrete production. In order to reduce water and paste absorption from concrete mixture, porous aggregate is subjected to initial impregnation (e.g. with polymers, kerosin, paraffin, cement paste) or saturation with water. The latest method, because of its simplicity and considerably lower costs, is recommended in guidelines to lightweight concrete performance, valid in many countries including Poland. Amount of water absorbed by porous aggregate in the first minutes of its saturation ranges usually from 50 up to 90% of its absorption capacity. Therefore water absorption after 30÷60 minutes is the most common assumed level of initial moisture of lightweight aggregate. In most cases after this time absorption of water from concrete mixture by porous aggregate is essentially limited and it is of less importance for slump loss. Nevertheless in the case of aggregate having higher absorbability, as well as in the case of concrete produced out of building place and/or pumping transport, lightweight aggregate is usually moistened to considerable higher humidity, e.g. corresponding to water absorption after 24 hours or even to full saturation.

Initial moistening of lightweight aggregate, commonly recommended and applied in practice, is usually considered only during production of concrete mixture, while it is also important for later properties of hardened concrete, especially for its durability. Absorption of water from concrete mixture by porous aggregate causes reduction of water-cement ratio of cement matrix, surrounding aggregate grains. It promotes the improvement of cement matrix tightness and strength. In technology of lightweight concrete when all aggregate, fine and coarse, is lightweight, cement paste is regarded as cement matrix, however when natural sand is used as fine aggregate it is cement mortar which is regarded as

prawa, gdy beton lekki wykonano z piasku naturalnego. Należy tu wyraźnie zaznaczyć, że nasiąkliwość kruszyw lekkich w mieszance betonowej jest z reguły mniejsza, a przebieg zjawiska w czasie może być wolniejszy w porównaniu do procesu nasączenia tych kruszyw w wodzie. Zależnie od właściwości reologicznych matrycy cementowej oraz struktury porowatości kruszywa lekkiego, jego nasiąkliwość w mieszance betonowej mieści się w zakresie od 60 do 100% wartości oznaczonej metodą nasycania w wodzie (1, 2). W rezultacie rzeczywisty wskaźnik wodno-cementowy mieszanki betonowej z kruszywem lekkim jest niezwykle trudny do oszacowania. Określenie jego wartości dodatkowo komplikuje fakt wchłaniania przez kruszywo porowate nie tylko wody z mieszanki betonowej, ale i zaczynu cementowego. Korzystnymi aspektami tego zjawiska jest zwiększenie przyczepności stwardniałej matrycy cementowej do kruszywa lekkiego oraz możliwość dodatkowego uszczelnienia i wzmocnienia struktury samego kruszywa, posiadającego z reguły najmniejszą wytrzymałość ze wszystkich składników betonu lekkiego. Konsekwencją wchłaniania przez kruszywo porowate wody, lub nawet zaczynu, z mieszanki betonowej jest również większe zapotrzebowanie na zaczyn cementowy, niezbędny do uzyskania pożądanej konsystencji mieszanki. Wzrost proporcji między objętościowym udziałem bardziej wytrzymałej matrycy cementowej i słabszego oraz bardziej porowatego kruszywa może dodatkowo wpływać na zwiększenie szczelności i wzmocnienie struktury betonu (3). Można oczekiwać, że wielkość efektu uszczelnienia i wzmocnienia betonu, wynikającego z przedstawionych powyżej powodów związanych z wnikaniem wody, a nawet zaczynu, do kruszywa lekkiego, zależy od właściwości reologicznych i wytrzymałości zaczynu cementowego oraz zdolności kruszywa do wchłaniania wody, określoną jego porowatością, strukturą tej porowatości i wilgotnością wstępną.

2. Opis przeprowadzonych badań

Celem przeprowadzonych badań było ustalenie wpływu zdolności kruszyw lekkich do wchłaniania wody, przy różnym stopniu ich wstępnego nawilżenia, na nasiąkliwość betonu konstrukcyjnego. Dla pełniejszego wyjaśnienia wpływu badanego zjawiska na właściwości betonu, oddzielnym badaniom (wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość i jej przebieg w czasie), poddano również kruszywo lekkie oraz zaprawy cementowe. Do badań wytypowano kruszywo ze spiekanych popiołów lotnych o nazwie handlowej „polytag”, które z uwagi na stosunkowo dużą wytrzymałość (8 MPa dla frakcji 4/8 mm oraz 7 MPa dla 6/12 mm), spośród dostępnych krajowych kruszyw lekkich najlepiej nadaje się do produkcji konstrukcyjnych betonów lekkich.

Dodatkowo podjęto próbę ustalenia wpływu uszczelnienia porowatych ziaren kruszywa zaczynem cementowym na ich nasiąkliwość. Badania przeprowadzono na obu frakcjach kruszywa przy zastosowaniu próbek suchych (K_s) oraz wstępnie nawilżonych, do wilgotności odpowiadającej nasiąkliwości w wodzie po 30 minutach (K_w). Kruszywa o ustalonej wstępnej wilgotności poddawano procesowi nasączenia w trzech zaczynach z cementu CEM I

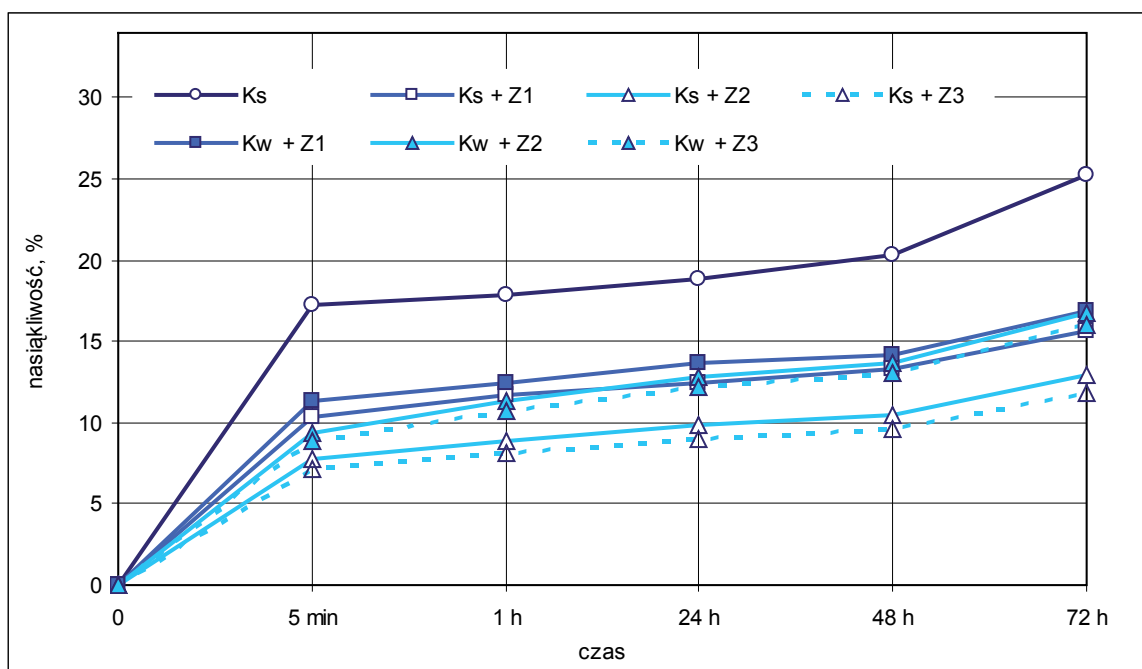
cement matrix. It should be clearly stated, that water absorption of lightweight aggregate in concrete mixture is usually lower and the course of the phenomenon may have less dynamic nature in comparison to aggregate absorption in pure water. Depending on rheological properties of cement matrix and on porosity structure of lightweight aggregate, its absorption in concrete mixture is 60 up to 100% of absorption specified in water (1, 2). As result, the real water to cement ratio of concrete mixture with lightweight aggregate is extremely difficult to assess. Estimation of its value is additionally complicated by absorption not only of water, but also of cement paste by aggregate from concrete mixture.

The advantageous consequences of this phenomenon are: adhesion improvement between cement matrix and lightweight aggregate as well as possible sealing and strengthening of aggregate structure itself. The latest aspect is especially important, because in lightweight concrete the weakest strength element of the composite is just aggregate. On the other hand, absorption of water/paste from concrete mixture by aggregate also results in higher demand of cement matrix, essential to achieve desired mixture consistency. The increase of volume share of cement matrix of higher strength in relation to aggregate of lower strength may additionally enhance tightness and strength of concrete structure (3). It may be expected, that the effect of concrete strengthening and sealing, resulting from presented above mechanisms connected with absorption of lightweight aggregate, is dependent on rheological and strength properties of cement matrix as well as absorption capacity of aggregate, determined by aggregate porosity, its structure and initial moisture.

2. Experimental details

The aim of carried out research was to determine the influence of absorption capacity of porous aggregate, at different levels of its initial moisture, on water absorption of structural lightweight concrete. For more complete analysis of researched phenomenon additional tests (compressive strength, water absorption and its change with time) were performed separately on lightweight aggregate and cement mortars. Sintered fly ash aggregate “polytag” was used for all research. It was selected among lightweight aggregates available in the market as the most appropriate to structural lightweight concrete, because of its relatively high crash strength (8 MPa for fraction 4/8 mm and 7 MPa for 6/12 mm).

Additionally independent tests of the influence of sealing of porous aggregate grains with cement paste on aggregate absorbability were carried out. For this research both fraction of polytag aggregate were used, in dry state (K_s) and initially moistened to humidity corresponding to its water absorption after 30 minutes (K_w). Dry and initially moistened aggregates were immersed in three pastes made of cement CEM I 42.5R. The pastes were characterized by various water-cement ratio and by different superplasticizer content SP (paste Z1: W/C = 0.55; paste Z2: W/C = 0.37; paste Z3: W/C = 0.37 + Sp = 1% of cement). After 30 minutes of saturation the aggregate was taken out and the paste excess was removed



Rys. 1. Nasiąkliwość wodą kruszywa frakcji 4/8 mm w stanie naturalnym i po nasączeniu zaczynami cementowymi w funkcji czasu (opis w tekście)

Fig. 1. Water absorption of aggregate 4/8 mm in natural state and after prior saturation in cement pastes as the function of time (details in text)

42,5R, charakteryzujących się różnym wskaźnikiem wodno-cementowym W/C, bez lub z dodatkiem superplastyfikatora Sp (zaczyn Z1: W/C = 0,55; zaczyn Z2: W/C = 0,37; zaczyn Z3: W/C = 0,37; tylko Z3 był z superplastyfikatorem Sp = 1% m.c.). Po 30 minutach nasączenia, próbkę kruszywa wyjmowano z zaczynu, a jego nadmiar usuwano z powierzchni. Po 28 dniach zbadano nasiąkliwość w wodzie tak przygotowanych próbek kruszyw. Uzyskane wyniki (rysunek 1) wykazują korzystny wpływ uszczelnienia kruszywa zaczynem cementowym. Nasiąkliwość kruszywa poddanego wcześniejszemu nasączeniu w zaczynach cementowych ulega znacznemu zmniejszeniu w porównaniu z kruszywami nie poddawanyymi tej impregnacji. Z uwagi na niewielkie różnice uziarnienia obu badanych frakcji, nie stwierdzono znaczących różnic w wynikach badań nasiąkliwości (25,3% w przypadku frakcji 4/8 mm oraz 23,4% dla 6/12 mm). Efektywność uszczelnienia porowatej struktury kruszywa lekkiego zaczynem jest natomiast zależna zarówno od parametrów reologicznych jak i od wytrzymałości zaczynu, a także od początkowej wilgotności kruszywa. Największy spadek nasiąkliwości, w porównaniu z nasiąkliwością kruszywa w stanie naturalnym (o ponad 50%), obserwuje się w przypadku kruszywa suchego wstępnie nasączonego w zaczynie o W/C = 0,37 z superplastyfikatorem ($K_s - Z3$). Kruszywo nasączone zaczynem o tym samym W/C, ale bez domieszki upłynniającej ($K_s - Z2$), wykazywało nieznacznie mniejszą zawartość wilgoci. Nasączenie kruszywa zaczynem o W/C = 0,55 ($K_s - Z1$) pozwoliło na zmniejszenie jego późniejszej nasiąkliwości tylko o około 35%. Podobny wpływ uszczelnienia uzyskano w przypadku kruszywa wstępnie nawilżonego (K_w). W tym jednak przypadku parametry reologiczne oraz wytrzymałość zaczynu miały mniejsze znaczenie, co prawdopodobnie wiąże się z mniejszą zdolnością wilgotnego kruszywa wchłaniania zaczynu cementowego.

from its surface. After 28 days from such treatment, the aggregate samples were immersed in water. Obtained results of water absorption are shown in Fig. 1; they clearly indicate the advantageous effect of aggregate sealing with cement paste. Water absorption of aggregate, subjected to prior saturation in cement pastes, decreased considerably in comparison to non-impregnated aggregate samples. Because of the low difference in porosity of both aggregate fractions, there was also no considerable difference in obtained results of their water absorption (25.3% for fraction 4/8 mm and 23.4% for fraction 6/12 mm). However, the sealing efficiency of porous structure of lightweight aggregate with cement paste is in turn dependent on rheological and strength properties of cement paste, as well as on initial moisture of aggregate. The highest reduction of water absorption in relation to plain aggregate (by over 50%) was found in the case of dry aggregate saturated in cement paste of W/C = 0.37 with superplasticizer ($K_s - Z3$). Aggregate saturated in paste of the same water-cement ratio, but without superplasticizer ($K_s - Z2$), showed slightly lower water absorption. Saturation of aggregate with cement paste of W/C = 0.55 ($K_s - Z1$) caused the reduction of water absorption only by ca 35%. Similar effect was obtained for aggregate initially moistened (K_w). However, in this case the rheological parameters of cement paste were less important. Probably it was caused by lower absorbability of moistened aggregate toward cement paste.

The examination of influence of initial aggregate moisture on its absorbability in sealing of concrete structure, covered 12 lightweight concretes. One of two sintered fly ash aggregate fraction (4/8 mm or 6/12 mm) was used as coarse aggregate. Concretes were produced of cement mortars with natural sand, characterized by variable water to cement ratio (0.55 or 0.37), but constant cement to sand ratio, equal 1.20. The initial moisture of lightweight aggregate

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY I PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI WYKONANYCH BETONÓW LEKKICH

COMPOSITION AND BASIC PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE

Ozn. Designation*	Skład mieszanki betonowej Composition and properties				Składniki mieszanki betonowej, Composition of concrete mix, kg/m ³					Właściwości betonu po 28 dniach Concrete properties, strength after 28 days	
	W/C	frakcja, mm	wilgotność kruszywa w_k , %	objętość kruszywa objętość zaprawy, %	C**	Sp**	K**	P**	W**	gęstość D , kg/m ³	$f_{cm, cube}$ MPa
1Sd	0,55	4/8	0	42 / 68	516	0,0	572	619	284	1800	62,5
1Wd			18	59 / 45	338	0,0	950	406	186	1630	48,5
1Md			25	68 / 32	239	0,0	1171	288	132	1470	25,0
1Sg		6/12	0	46 / 71	508	0,0	603	610	279	1810	59,5
1Wg			17	61 / 47	336	0,0	945	404	185	1610	45,0
1Mg			23	67 / 34	255	0,0	1110	306	140	1500	30,0
2Sd	0,37	4/8	0	41 / 67	584	14,6	559	700	216	1920	83,5
2Wd			18	58 / 44	386	9,6	935	463	143	1710	64,0
2Md			25	70 / 31	268	7,0	1191	322	99	1600	40,5
2Sg		6/12	0	43 / 64	555	13,9	569	666	205	1920	79,5
2Wg			17	60 / 44	386	9,6	925	462	142	1710	58,5
2Mg			23	68 / 33	288	7,2	1129	346	107	1560	32,0

* S – kruszywo suche/dry aggregate, W – kruszywo wilgotne/moist aggregate, M – kruszywo nasycone/saturated aggregate, d – frakcja/fraction 4/8 mm, g – frakcja/fraction 6/12 mm

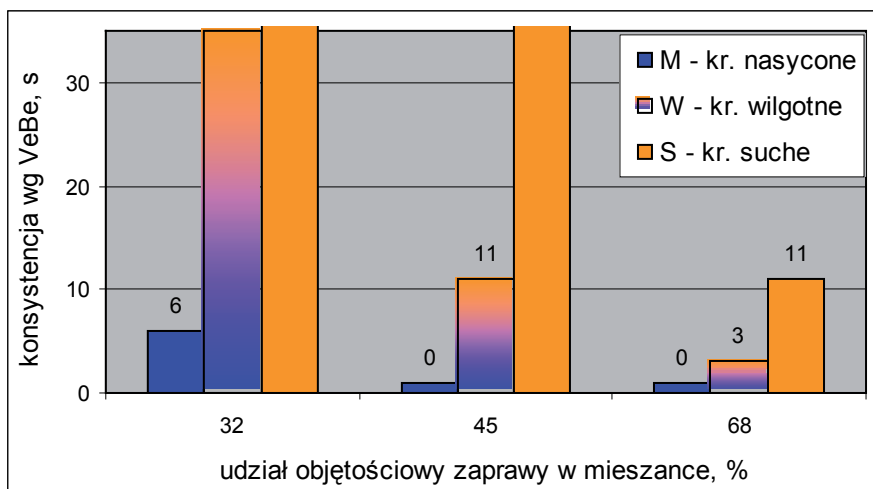
** C – CEM I 42,5R, Sp – superplastyfikator/superplasticizer, K – kruszywo lekkie w stanie suchym lub wstępnie nawilżone/dry aggregate or preliminary moisten, P – piasek naturalny/natural sand, W – woda/water

Do badań wpływu nasiąkliwości kruszywa, przy uwzględnieniu jego wstępnej wilgotności, na uszczelnienie struktury betonu zastosowano dwanaście wariantów jego składu. Jako kruszywo grube zastosowano jedną z frakcji popiołoporytu (4/8 mm lub 6/12 mm). Betony wykonano z zapraw cementowych z piasku naturalnego o zmiennym wskaźniku wodno-cementowym (0,55 lub 0,37), lecz o stałej proporcji masowej piasku do cementu (1,20). Przyjęto trzy wyjściowe wilgotności kruszywa, odpowiadające kolejno: stanowi suchemu (S), stanowi wilgotnemu uzyskanemu po 30. minutach zanurzenia w wodzie (W) oraz stanowi pełnego nasycenia wodą (M). Skład i właściwości stosowanych betonów lekkich przedstawiono w tablicy 1.

Ilość zaprawy cementowej użytej do wykonania mieszanek wynikała z możliwości uzyskania odpowiedniej urabialności, zapewniającej właściwe jej zagęszczenie, bez tendencji kruszywa do segregacji. Trzeba podkreślić, że w przeciwieństwie do betonów zwykłych, w przypadku betonów lekkich nie zawsze jest możliwość uzyskania poprawnej, z punktu widzenia urabialności, konsystencji mieszanki przy zastosowaniu stałego udziału zaprawy cementowej oraz kruszywa o pewnej wstępnej wilgotności. Na przykład, mieszanki z kruszyw w pełni nasyconych wodą okazywały się urabialne jedynie w przypadku, gdy zawartość zaprawy cementowej wynosiła około 32% objętościowo. Tak niewielka ilość zaprawy, gwarantująca jeszcze zwartą strukturę betonu, zapewniała stosunkowo płynną konsystencję mieszanki, odpowiadającą czasowi 6 – 7 s w próbie VeBe. Zwiększenie zawartości zaprawy po-

gate was establish at three levels, corresponding respectively to: oven-dry state (S), air-dry moistened state obtained after 30 minutes of saturation in water (W) and completely saturated state (M). Compositions and basic parameters of obtained lightweight concrete are presented in Table 1.

Amount of cement mortar used to produce lightweight concrete mixture was governed by suitable workability, providing proper concrete compaction without aggregate tendency for segregate. It should be emphasized, that contrary to ordinary concrete, in the case of lightweight concrete, not always is the possibility to achieve suitable mixture consistency at application of a given cement mortar and aggregate, of a given initial moisture. For example, mixtures with fully saturated aggregate can be workable only in the case when mortar content was about 32% by volume. Such insignificant amount of cement matrix, providing still tight structure of lightweight concrete, assured relatively fluid consistency of concrete mixture corresponding to the time 6 – 7 s of Vebe test. However, the increase of matrix content caused aggregate segregation. Application of analogical volume of mortar (ca 32%) to moistened air-dry or oven dry aggregate resulted in completely unworkable mixtures, even despite of high superplasticizer addition (2.5% of cement) i.e. the threshold value given by producer. The possibility to obtain consistency of 10 – 15 s of Vebe test needed mortar content as high as ca 45% and ca 68% by volume, for concrete mixtures with moistened air-dry and oven-dry aggregate respectively (Fig. 2). The higher fluidity of concrete mixture with oven-dry



Rys. 2. Wpływ wstępnej wilgotności kruszywa (frakcja 4/8 mm) oraz zawartości zaprawy ($W/C = 0,55$) na konsystencję mieszanki betonowej

Fig. 2. The influence of initial moisture of aggregate (fraction 4/8 mm) and mortar content ($W/C = 0.55$) on concrete mixture consistency

wodowało dodatkowo segregację kruszywa. Zastosowanie analogicznej objętości zaprawy (ok. 32%) w przypadku kruszyw wilgotnych lub suchych daje mieszanki nie urabialne, nawet pomimo zastosowania maksymalnego dopuszczalnego przez producenta dodatku superplastyfikatora (2,5% m.c.). Uzyskanie konsystencji 10 – 15 s w próbie VeBe było możliwe dopiero gdy zawartość zaprawy wynosiła około 45% i 68% objętościowo, odpowiednio dla mieszanek z kruszywa wilgotnego i suchego (rys. 2). Dążenie do większego stopnia płynności mieszanek z kruszyw suchych należy ocenić jako nieracjonalne ze względu na duże zużycie cementu oraz znaczną gęstość betonu, zbliżoną do wartości granicznej dla betonów lekkich, wynoszącą 2000 kg/m^3 .

Podsumowując, z opisanych powodów betony z kruszyw o mniejszej wilgotności, a więc o większej zdolności do wchłaniania wody, a także zaczynu, musiały zawierać więcej zaprawy. Analizując podane w tablicy 1 składy betonów należy zwrócić uwagę, że ze względu na wchłanianie przez kruszywo lekkie wody i prawdopodobnie także zaczynu, suma objętości absolutnych kruszywa i zaprawy, wynikających z ilości dodanych składników, może nie być równa objętości mieszanki betonowej. Wyjątek stanowią betony z kruszywa w pełni nasyconego wodą, natomiast w przypadku betonów wykonywanych z kruszywa wilgotnego można oszacować, że około 40% objętości betonu zajmuje zaprawa, podczas gdy jej udział wynikający z sumy objętości absolutnych jej składników wynosi około 45%. W przypadku betonów z kruszyw suchych te dysproporcje są jeszcze większe: objętość zaprawy cementowej, obliczonej w oparciu o sumę objętości jej składników to aż ok. 68%, lecz jej udział można oszacować jedynie na około 57%. Można jednak przypuszczać, że kruszywo wchłania głównie wodę. Trzeba więc podkreślić, że w przypadku kruszywa lekkiego nie w pełni nasyconego wodą, rzeczywisty wskaźnik wodno-cementowy będzie mniejszy niż nominalny i trudny do określenia.

Omówione szczegółowo zagadnienie trudności w uzyskaniu odpowiedniej urabialności mieszanki betonowej w przypadku różnej

aggregate could be obtained with irrationally high cement content and significant concrete density, close to the threshold value of 2000 kg/m^3 for lightweight concrete.

Reassuring, because of described above reasons, concretes with aggregates of lower initial moisture, therefore of higher water absorbability, should have higher mortar content. Juggling concrete compositions, given in Table 1, it should be noted, that due to absorption of water/paste from concrete mixture by lightweight aggregate, the sum of absolute volumes of aggregate and mortar, resulting from applied amounts of individual components, may exceed the unit of concrete volume. The only exception is concrete with saturated aggregate. In the case of concrete made of moist aggregate mortar volume in concrete is assessed for 40%, while its share estimated on the basis of the sum of absolute volume of its components is ca 45% by volume. In the case of concrete with oven-dry aggregate these disproportions are even higher: the volume of cement matrix, calculated from the volumes of its components is equal 68%, but its assessed share is only 57%. It may be supposed that aggregate absorbs chiefly water. Therefore it should be mentioned that, in the case of lightweight concrete with aggregate not completely saturated with water, the real cement to water ratio of cement matrix is lower than the nominal one and it is generally difficult to define.

The presented difficulties to achieve suitable workability of lightweight concrete with aggregate of different initial moisture and linked with the above the necessity of cement share increase, must influence properties of both: concrete mixture and hardened concrete, especially these connected with its permeability. For these reasons concretes produced from aggregate of lower initial moisture will have considerably higher compressive strength (Table 1). In the extreme case of oven dry aggregate application, compressive strength of concrete (1Sd, 1Sg, 2Sd and 2Sg) was 2 to 2.5 times higher than the strength of concretes of saturated aggregate (1Md, 1Mg, 2Md and 2Mg). Compressive strength of concrete produced of various fraction of sintered fly ash aggregate showed only slight difference, at advantage of fraction 4/8 mm. This fraction was characterized by a little higher crash strength.

3. Lightweight aggregate water/ paste absorbability and the effect of concrete sealing

Based on results of water absorption tests, according to PN-88/B-06250 (4), it was found that concretes of dry aggregate, and thus with higher cement content, had shown significantly lower water absorption. In the case of mortar with $W/C = 0.55$, concretes of oven dry aggregate had over twice as low water absorption (9.4% - 10%) as the concretes of about half cement content

wilgotności kruszywa i wynikająca stąd konieczność zmniejszania zawartości cementu, musi wywierać wpływ zarówno na właściwości mieszanki betonowej, jak i betonu dojrzałego, a w szczególności na jego przepuszczalność. Z tego między innymi powodu betony wykonywane z kruszyw o mniejszej wilgotności wstępnej będą wyróżniały się większą wytrzymałością na ściskanie (tablica 1). W skrajnych przypadkach zastosowania kruszywa suchego wytrzymałość betonów (1Sd, 1Sg, 2Sd i 2Sg) była od 2 do 2,5 x większa od wytrzymałości betonów na kruszywie nasyconym wodą (1Md, 1Mg, 2Md i 2Mg). Wytrzymałość betonów wykonywanych z różnych frakcji kruszywa popiołoporytowego wykazywała jedynie nieznaczne zróżnicowanie na korzyść frakcji 4/8 mm. Kruszywo to ma bowiem nieco większą wytrzymałość na miazdzenie.

3. Zdolność kruszywa lekkiego do wchłaniania wody i zaczynu, a uszczelnienie betonu

W oparciu o wyniki badań nasiąkliwości, przeprowadzonych zgodnie z PN-88/B-06250 (4), stwierdzono, że betony lekkie wykonywane z kruszyw suchych, a więc o większej zawartości cementu, miały znacznie mniejszą nasiąkliwość. W przypadku zaprawy o W/C = 0,55 betony z kruszyw suchych wykazywały nasiąkliwość dwukrotnie niższą (9,4% do 10%) w stosunku do betonów z kruszywami nasyconymi wodą (18,7% do 21,9%) i zawierającymi mniej więcej połowę cementu. W przypadku betonu z zaprawą o niższym wskaźniku wodno-cementowym (W/C = 0,37) spadek nasiąkliwości był jeszcze większy, bo blisko trzykrotny (z 16,7–18,1% do 5,6–6,3%). Szczegółowe wyniki pokazano na rysunku 3. Wyniki te są efektem nie tylko różnych proporcji objętościowych zaprawy, a przede wszystkim cementu i kruszywa, ale zapewne także obniżenia wskaźnika wodno-cementowego zaprawy wskutek odciągania z niej wody przez kruszywo oraz prawdopodobnego uszczelnienia ziaren kruszywa wchłoniętym zaczynem. Gdyby pominąć wspomniany wpływ uszczelnienia kruszywa i zaprawy i założyć, że zmniejszenie nasiąkliwości betonów z kruszyw o niższej wilgotności wyjściowej było wyłącznie wynikiem większej zawartości zaprawy cementowej, wówczas teoretycznie oszacowana nasiąkliwość betonu, rozumiana jako średnia ważona nasiąkliwości kruszywa i zaprawy, obliczona zgodnie z [1], powinna być porównywalna z nasiąkliwością oznaczoną doświadczalnie (rys. 3).

$$n_{b(t)} = \frac{K_s}{D} \cdot n_k + \frac{D - K_s}{D} \cdot n_m \quad [1]$$

gdzie:

$n_{b(t)}$ – teoretyczna nasiąkliwość betonu, %;

n_k – nasiąkliwość kruszywa lekkiego, %;

n_m – nasiąkliwość zaprawy cementowej, %;

K_s – zawartość kruszywa suchego, kg/m^3 ; $K_s = K / (1 + w_k)$;

K – zawartość kruszywa w o wilgotności wyjściowej, kg/m^3 ;

w_k – wilgotność wyjściowa kruszywa, %;

D – gęstość betonu w stanie suchym, kg/m^3 .

Z wykresów słupkowych pokazanych na rysunku 3 wynika, że jedynie w przypadku betonów wykonanych z kruszywa nasycone-

produced with saturated aggregate (18.7% - 21.9%). In the case of concrete of the mortar with W/C = 0.37 the decrease of water absorption was almost threefold higher (16.7 – 18.1% compared to 5.6 – 6.3%). Detailed results are presented in Fig. 3. Such reduction of lightweight concrete water absorption was caused not only by higher volume share of cement mortar, especially by higher cement content, but without doubt also by the decrease of the water to cement ratio, caused by absorption of water from the mixture, as well as by the effect of sealing aggregate grains with absorbed paste. If the effect of aggregate sealing will be neglected and one assumes that the decrease of water absorption of lightweight concrete from aggregate of lower initial moisture was caused only by higher mortar content, then the theoretical water absorption of concrete, estimated as the weighted mean of water absorption of aggregate and mortar, calculated according to [1], should be comparable to the water absorption measured by tests (Fig. 3).

$$n_{b(t)} = \frac{K_s}{D} \cdot n_k + \frac{D - K_s}{D} \cdot n_m \quad [1]$$

where:

$n_{b(t)}$ – theoretical water absorbability of concrete, %;

n_k – water absorbability of lightweight aggregate, %;

n_m – water absorbability of cement mortar, %;

K_s – mass of aggregate in oven-dry state, kg/m^3 ; $K_s = K / (1 + w_k)$;

K – mass of aggregate initially moistened, kg/m^3 ;

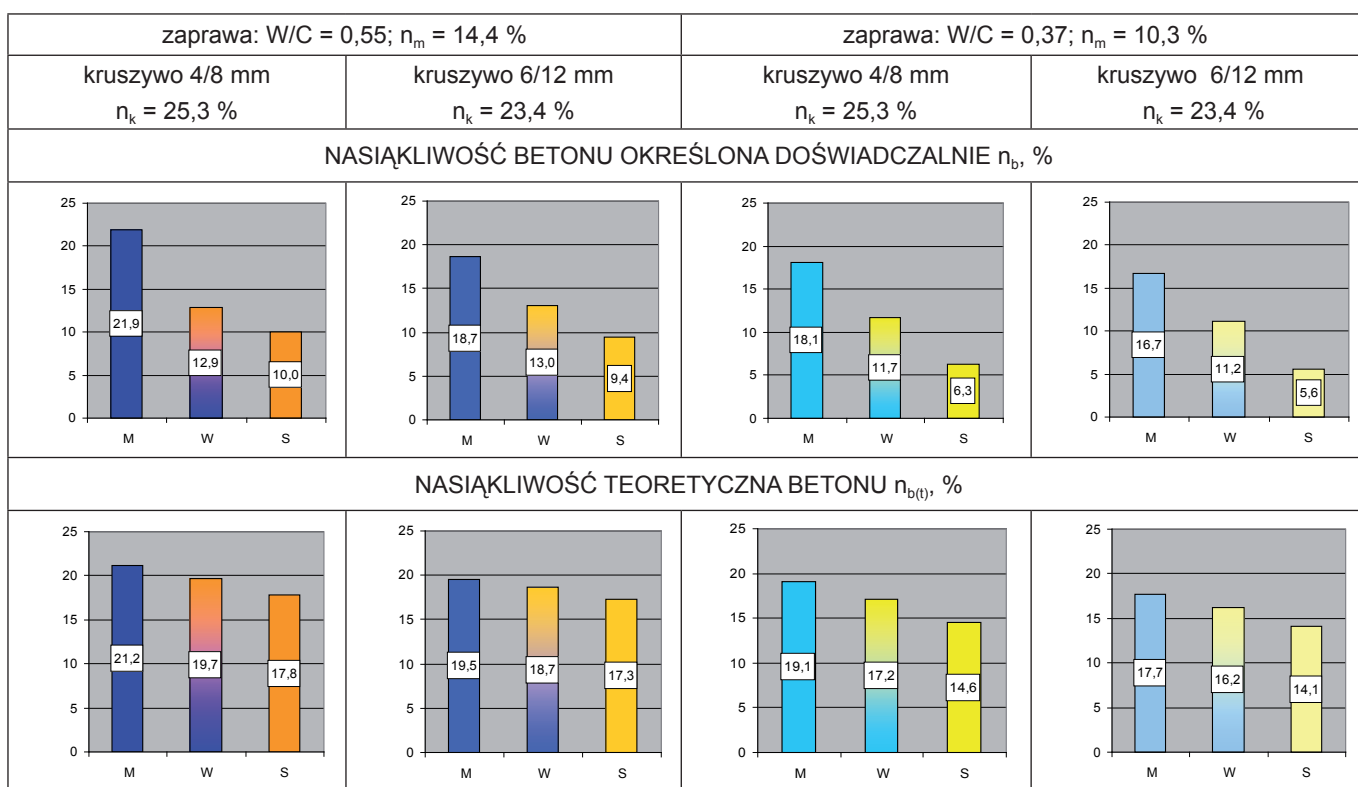
w_k – initial moisture of aggregate, %;

D – oven-dry density of concrete, kg/m^3 .

As it can be seen on histograms presented in Fig. 3, only in the case of concretes of saturated aggregate (M), the calculated theoretical water absorption is almost the same as measured in tests. In the other cases theoretically estimated values of water absorption of lightweight concrete are considerably higher than the values found in tests.

The analyze of influence of applied lightweight aggregate grading on water absorption of concrete shows a little higher values for concrete made of fraction 4/8 mm, in spite of higher strength of this concrete. Higher water absorption in this case is probably caused by some content of crushed grains. That is why water absorption of fraction 4/8 mm was slightly higher in comparison with fraction 6/12 mm. The latest fraction does not contain of crushed grains. It should be pointed that in the case of aggregate initially not completely saturated with water, the difference in water absorbability of concretes made of both aggregate fractions are insignificant. The crushed grains of sintered aggregate, characterized by higher water absorbability, are also sealed with absorbed paste.

The comparison of water absorption measurements with requirements of standard PN-91/B-06263 (5) (current standard PN-EN 206-1 does not consider such requirements to concrete), it should be stated that all examined concretes fulfilled criterions for lightweight concrete, does not exposed to atmospheric condition ($n_b < 25\%$). In the case of concretes, exposed to direct action of atmosphere factors, only one concrete made of saturated aggre-



Rys. 3. Wpływ wstępnej wilgotności kruszywa (M – nasycone; W – wilgotne; S – suche) na nasiąkliwość betonu

Fig. 3. The influence of initial moisture of aggregate (M – saturated; W – moistened; S – oven-dry) on water absorption of concrete

go wodą obliczona nasiąkliwość teoretyczna oraz oznaczona doświadczalnie są prawie identyczne. W pozostałych przypadkach nasiąkliwości oszacowane teoretycznie są znacznie większe od wartości oznaczonych doświadczalnie.

Analiza wpływu uziarnienia kruszywa lekkiego na nasiąkliwość betonu wskazuje na nieznacznie większe jej wartości w przypadku betonów z kruszywa frakcji 4/8 mm, pomimo że właśnie te betony miały większą wytrzymałość. Większa nasiąkliwość w tym przypadku może wynikać z pewnej zawartości ziaren pokruszonych. Potwierdzają to wyniki badania nasiąkliwości obu frakcji, nieznacznie wyższe dla frakcji 4/8 mm w stosunku do frakcji 6/12 mm, która nie zawiera ziaren pokruszonych. Trzeba podkreślić, że w przypadku kruszyw nienasyconych wodą, różnice w nasiąkliwości betonów wykonanych z obu frakcji, są w zasadzie pomijalne. Ziarna pokruszone kruszyw spiekanych, wykazujące większą nasiąkliwość, w tym przypadku również ulegają uszczelnieniu wchłanianym zaczynem.

Porównując uzyskane wyniki z wymaganiami normy PN-91/B-06263 (5) (obecnie obowiązująca norma PN-EN 206-1 nie stawia w tym zakresie żadnych wymagań), należy stwierdzić, że nasiąkliwość wszystkich badanych betonów spełnia wymagania dla betonu lekkiego eksploatowanego w warunkach zabezpieczenia go od kontaktami atmosferycznymi ($n_b < 25\%$). W przypadku betonu niezabezpieczonego, narażonego na bezpośrednie działanie czynników atmosferycznych, kryterium nasiąkliwości mniejszej od 20 % nie spełnia jedynie beton z nasyconego wodą kruszywa frakcji 4/8 mm i zaprawy o W/C = 0,55. Na-

gate 4/8 mm and mortar with W/C = 0.55 did not fulfill the criterion of water absorption, in this case lower than 20%. However, for concretes made of dry aggregate, the common opinion (6, 7) about essentially higher water absorption of lightweight concrete is not justified.

It should be also underlined, that generally higher water absorbability of lightweight concrete does not always need to mean its lower durability in comparison to normal concrete. On account of significantly better structural homogeneity of lightweight concrete and very good adhesion between cement matrix and aggregate grains, this concrete usually has no cracks. It is the reason of relatively lower permeability for water and also solutions, including aggressive ones, which migration into concrete is limited.

4. Conclusions

The results of the experiments clearly show crucial influence of porous aggregate water absorbability, as well as probably cement paste, on the sealing effect of structural lightweight concrete structure. On account of mechanical properties of lightweight concrete, especially its durability, the problem of initial moistening of aggregate, determining its further water absorbability in concrete mixture, does not concern only concrete mixture, but also hardened concrete. Initial moistening of aggregate, commonly applied in lightweight concrete technology in order to reduce cement demand, limits advantageous effect of concrete sealing and strengthening. In result of absorption of water and paste by porous aggregate

tomiast powszechne przekonanie o większej nasiąkliwości betonów lekkich wykonanych z kruszyw suchych (6, 7) w porównaniu do betonów zwykłych, nie jest uzasadnione.

Należy również podkreślić, że w ogólnym przypadku większa nasiąkliwość betonów lekkich nie zawsze musi oznaczać ich mniejszą trwałość w stosunku do betonów zwykłych. Z uwagi na znacznie większą jednorodność betonu lekkiego i bardzo dobrą przyczepność matrycy cementowej do ziaren kruszywa, beton ten z reguły pracuje w stanie nie zarysowanym, ograniczając tym samym możliwość penetracji wody lub roztworów wodnych, w tym agresywnych.

4. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują na duży wpływ zdolności kruszyw porowatych do wchłaniania wody, a także przypuszczalnie zaczynu, na uszczelnienie struktury lekkich betonów konstrukcyjnych. Biorąc pod uwagę właściwości mechaniczne, a także trwałość betonu lekkiego, zagadnienie wstępnego nawilżenia kruszywa, wpływającego na jego zdolność do odciągania wody z mieszanki betonowej, nie dotyczy wyłącznie mieszanki betonowej, lecz również stwardniałego betonu. Wstępne nawilżanie kruszywa, stosowane powszechnie w celu wyeliminowania zjawiska utraty urabialności mieszanek betonowych z kruszywami lekkimi oraz w celu obniżenia w nich zawartości cementu, zmniejsza korzystny wpływ uszczelnienia i w ten sposób wzmocnienia betonu. W wyniku wchłaniania przez kruszywo części wody zarobowej i zaczynu, następuje zarówno zwiększenie szczelności matrycy cementowej (zmniejszenie stosunku W/C), jak i zwiększenie szczelności samego kruszywa. Oba te zjawiska sprzyjają wzrostowi wytrzymałości betonu oraz zmniejszeniu jego nasiąkliwości.

Ograniczenie początkowej wilgotności kruszyw lekkich jest wskazane w przypadkach lekkich betonów konstrukcyjnych, zwłaszcza wyższych wytrzymałości, dla których i tak konieczny jest duży dodatek cementu ze względu na wymagane właściwości mechaniczne. Natomiast zastosowanie suchego kruszywa lekkiego jest szczególnie zalecane w przypadku betonów przeznaczonych do eksploatacji w niekorzystnych warunkach. Duża szczelność tych betonów lekkich, charakteryzujących się znaczną zawartością cementu, wynikającą z zastosowania suchego kruszywa, wykazuje, że ich trwałość, a więc mrozoodporność oraz przepuszczalność dla cieczy i gazów, mogą okazać się korzystniejsze w porównaniu z betonami wytwarzanymi z kruszyw wstępnie nawilżonych.

from concrete mixtures, enhancement of tightness of both cement matrix (due to decreasing its water to cement ratio) and aggregate occurs. Both these phenomenon directly promote the increase of concrete strength and reduction of its water absorbability.

Limitation of initial aggregate moisture should be recommended in the case of structural lightweight concrete, particularly if higher strength is indispensable, for which high cement content is required anyway on account of specified mechanical properties. However oven dry aggregate should be applied especially in the case of concrete to be exposed in more severe conditions. High tightness of this lightweight concrete, characterizing by high cement content, resulting from application of dry aggregate, assures good durability, i.e. freeze and thaw resistance and low permeability for liquids and gases, which can be more advantageous in comparison with lightweight concrete made of initially moistened aggregate.

Literatura / References

1. M. Sandvik, T.A. Hammer, Congress on SLAC, p. 617, Sandefjord 1995.
2. ACI 211.2-98, Standard practice for selecting proportions for SLWAC, American Concrete Institute, Farmington Hills 1998.
3. L. Domagała, Przegląd Budowlany, s. 22, 12 (2005).
4. PN-88/B-06250 Beton zwykły.
5. PN-91/B-06263 Beton lekki kruszywowo.
6. S. Chandra, L. Berntsson, Lightweight aggregate concrete, Noyes Publications, New York 2003.
7. ACI 213R-87, Guide for structural lightweight aggregate concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills 1997.