

Badanie właściwości betonu komórkowego w funkcji wytrzymałości na ściskanie przy zastosowaniu ortogonalnego planu doświadczenia

Orthogonal experimental study on the aerated concrete basing on the compressive strength

1. Wprowadzenie

Betony komórkowe są materiałem wykazującym szczególne właściwości obejmujące izolację cieplną i akustyczną oraz doskonałą ochronę ogniową. Mogą być stosowane do wykonywania ścian, podłóg i pokryć dachowych oraz innych elementów budowlanych. Autoklawizowany beton komórkowy (ABK) wytwarza się z cementu, wapna, materiałów krzemionkowych (piasek kwarcowy, popiół lotny) i małej ilości proszku glinu (1). ABK zawiera sporo tobermoritu ($5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) i kwarcu. Należy on do korzystnych dla środowiska materiałów budowlanych, gdyż może być łatwo powtórnie wykorzystywany.

W Japonii, w Indiach, w Stanach Zjednoczonych i innych krajach, badania betonu komórkowego rozpoczęły się dawno i technologia jest dobrze poznana. Właściwości betonu komórkowego są opisane (2). Wymiary bloczków, ich kształt, metody powstawania porów, kierunki obciążenia, wiek i zawartość wody, charakterystyka stosowanych składników oraz ich wpływ na wytrzymałość betonu komórkowego są opisane (3-7). Badanie i stosowanie betonu komórkowego w Chinach rozpoczęły się późno. Specjaliści w Chinach podjęli dużo badań właściwości betonów komórkowych obejmujących badania fizyczne i zmiany zastosowań betonu komórkowego (8-11).

Beton komórkowy można traktować jako sztywny „beton piankowy”, gdyż 80% objętości stanowią małe bąbelki powietrza. Beton ten jest wyjątkowo lekkim materiałem o małym przewodnictwie cieplnym. Jednak mała wytrzymałość na zginanie i ściskanie betonu komórkowego stwarza pewne problemy w przypadku przecinania, transportowania i stosowania. Z tego względu trzeba dalej badać wpływ różnych czynników na te właściwości. Ortogonalny plan badań stwarza możliwość rozsądnego prowadzenia doświadczeń i zmniejszenia liczby doświadczeń przez zastosowanie ortogonalnego układu i zasad planowania zrównoważonej dyspersji statystycznej oraz porównywalności (12). W tej pracy otrzymano beton komórkowy poddany obróbce parą i działaniu dwutlenku węgla. W oparciu o ocenę wpływu ilościowego

1. Introduction

Aerated concrete provides a structural building system with inherent properties that include thermal insulation, acoustical insulation, and excellent fire protection ratings. It can be used as walls, floor and roof decks, and other building components. Autoclaved aerated concrete (AAC) is produced using cement, lime, siliceous materials (quartz sand, fly ash) and small quantities of aluminum powder (1). AAC is mainly composed of tobermorite ($5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) and quartz. It is an environmentally “green” building material because it is easily recycled.

In Japan, India, United States and other countries, the study on aerated concrete started early and the technology is mature. The characteristics of aerated concrete are described (2). The specimen size and shape, method of pore-formation, direction of loading, age, water content, characteristics of ingredients used are reported to influence the strength of aerated concrete (3-7).

The study and application of aerated concrete in China started late. Scholars in China have carried out many researches on thermophysical properties, mechanical properties and performance modification of aerated concrete (8-11).

Aerated concrete can be described as rigid “concrete foam” since up to 80% of its volume consists of small air bubbles. The structure of the concrete gives the material exceptionally light weight, high thermal resistance. However, the low bending and compressive strength of aerated concrete bring out some problem in cutting, transporting and application. Therefore, it is necessary to further discuss effects of various influencing factors. Orthogonal experimental design can arrange experiments reasonable and reduce the number of tests by using orthogonal layout and design principles of balanced dispersion and comparability (12). In this study, aerated concrete was prepared and cured by the method of vapor treatment and carbon dioxide curing. Based on discussing effects of mixing quantity of raw materials on compressive strength of aerated concrete, experiment was arranged and analyzed by orthogonal

materiałów wyjściowych na wytrzymałość na ściskanie betonu komórkowego zaplanowano doświadczenia, których ocenę przeprowadzono metodą ortogonalnego planu doświadczenia. W końcu otrzymano korzystny udział materiałów stosowanych do produkcji betonu komórkowego.

2. Materiały i metody

2.1. Główne materiały wyjściowe

Gęstość pozorną kwarcowego piasku wynosiła 2951 kg/m³, a gipsu 2587,8 kg/m³. Cement stosowany w doświadczeniach był cementem portlandzkim klasy 52,5 produkcji Jiangnan-xiaoyetian Cement Co., Ltd. Fizyczne właściwości i chemiczny skład cementu podano w tablicy 1.

Tablica 1 / Table 1

FIZYCZNE I CHEMICZNE WŁAŚCIWOŚCI CEMENTU

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF CEMENT

Powierzchnia właściwa Specific surface area, m ² /kg	Normalna zawartość wody Water requirement of normal consistency %	MgO %	Si ₂ O ₃ %	C ₃ A %	Straty prażenia Loss on ignition %	Wytrzymałość na zginanie po 28 dniach Flexural strength after 28 days, MPa	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach Compressive strength after 28 days, MPa
394	26.8	1.06	2.44	6.6	2.97	9.6	63.8

2.2. Aparatura podstawowa

Komora do obróbki parą, o maksymalnej temperaturze 75°C; suszarka elektryczna o maksymalnej temperaturze 100°C i maszyna wytrzymałościowa TYA-2000.

2.3. Metody

Gips, cement i wapno mieszano z wodą przez pięć minut. Następnie dodawano proszek glinowy i mieszano przez 30 s. Z wszystkich składników otrzymano w trakcie mieszania zaczyn, którym wypełniono formy (40 x 40 x 160 mm³) do jednej trzeciej wysokości. Formy umieszczono w komorze do obróbki parą w 50°C. Próbkę obcinano po 3 godzinach i rozformowywano po 24 godzinach. Następnie kształtki dojrzewały w komorze do obróbki parą w 70°C przez 48 godzin, a następnie poddawano działaniu CO₂ przez 24 godziny. Wytrzymałość na ściskanie próbek betonu komórkowego oznaczano zgodnie z zasadami pomiarów bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego (GB 11968-2006).

3. Wyniki i ich omówienie

3.1. Wstępne proporcje zastosowanych składników

Udziały materiałów wapienniczych i krzemionkowych zastosowanych w tych badaniach ustalono na około 50%. Założono, że zawartość gipsu powinna być mniejsza od 6%. Dodatek proszku gli-

experimental design. Finally, the optimum mixing proportion of aerated concrete was obtained.

2. Raw materials and test methods

2.1. The main raw materials

Apparent density of quartz sand is 2951 kg/m³; apparent density of gypsum is 2587.8 kg/m³; Cement used in this study is P-O 52.5 supplied by Jiangnan-xiaoyetian Cement Co., Ltd. The physical and chemical properties of cement are given in Table 1.

2.2. The main equipment

Steam curing box, the maximum temperature of which is 75°C; Electric drying oven with the maximum temperature of 100°C. TYA-2000 compression testing machine.

2.3. Experimental method

Plaster, cement and lime are mixed with water for five minutes. Then, aluminum powder is added and mixed for 30 seconds. From all raw materials paste was produced during mixing and then poured into moulds (40 × 40 × 160 mm³), up to two thirds of its height. The moulds are put into the steam curing box at 50°C. The samples are shaped by precision wire after 3 hours and demoulded at 24 hours. Finally, the samples are cured in the steam curing box at 70°C for 48 hours and then in the condition of CO₂ for 24 hours. The compressive strength of aerated concrete is tested according to Autoclaved aerated concrete blocks (GB 11968-2006).

3. Results and discussions

3.1. Preliminary identification of mixed constituents proportion

The quantity of calcareous and siliceous materials used in this study is identified to be about 50%, respectively. The content of gypsum should be less than 6%. The addition of aluminium powder is about 0.06%. The ratio of water to ingredients was about 0.6.

3.2. Orthogonal experimental design

In this paper, the influence of the range of variable values and level of significance of the mixed components quantity on the compres-

Tablica 2 / Table 2

POZIOMY CZYNNIKÓW W ORTOGONALNYM PLANIE DOŚWIADCZENIA

THE INVESTIGATED FACTORS LEVEL

Czynnik Factor Poziom Level	A	B	C	D	E
	Stosunek wody do spoiwa The ratio of water to binder	Proszek glinowy Aluminum powder, %	Piasek kwarcowy Silica sand, %	Gips Gypsum, %	Stosunek zawartości cementu do wapna The content ratio of cement to lime
1	0.50	0.05	35	3	1 : 1
2	0.55	0.06	38	4	1 : 1.5
3	0.60	0.07	42	5	1 : 2
4	0.65	0.08	45	6	1 : 2.5

Tablica 3 / Table 3

ORTOGONALNY PLAN DOŚWIADCZENIA

ORTHOAGONAL TABLE

Kolejność Order	Stosunek wody do spoiwa The ratio of water to binder A	Proszek glinowy Aluminum powder, % B	Piasek kwarcowy Silica sand, % C	Gips Gypsum, % D	Cement: wapna Cement : lime E	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa
1	0.50 (1)	0.05 (1)	35 (1)	3 (1)	1 : 1 (1)	1.00
2	0.50 (1)	0.06 (2)	38 (2)	4 (2)	1 : 1.5 (2)	1.00
3	0.50 (1)	0.07 (3)	42 (3)	5 (3)	1 : 2 (3)	0.68
4	0.50 (1)	0.08 (4)	45 (4)	6 (4)	1 : 2.5 (4)	0.38
5	0.55 (2)	0.05 (1)	38 (2)	5 (3)	1 : 2.5 (4)	0.43
6	0.55 (2)	0.06 (2)	35 (1)	6 (4)	1 : 2 (3)	0.34
7	0.55 (2)	0.07 (3)	45 (4)	3 (1)	1 : 1.5 (2)	0.43
8	0.55 (2)	0.08 (4)	42 (3)	4 (2)	1 : 1 (1)	0.48
9	0.60 (3)	0.05 (1)	42 (3)	6 (4)	1 : 1.5 (2)	0.74
10	0.60 (3)	0.06 (2)	45 (4)	5 (3)	1 : 1 (1)	0.65
11	0.60 (3)	0.07 (3)	35 (1)	4 (2)	1 : 2.5 (4)	0.67
12	0.60 (3)	0.08 (4)	38 (2)	3 (1)	1 : 2 (3)	0.34
13	0.65 (4)	0.05 (1)	45 (4)	4 (2)	1 : 2 (3)	0.43
14	0.65 (4)	0.06 (2)	42 (3)	3 (1)	1 : 2.5 (4)	0.34
15	0.65 (4)	0.07 (3)	38 (2)	6 (4)	1 : 1 (1)	0.92
16	0.65 (4)	0.08 (4)	35 (1)	5 (3)	1 : 1.5 (2)	0.46

nowego wynosił około 0,06%. Stosunek wody do spoiwa wynosił około 0,6.

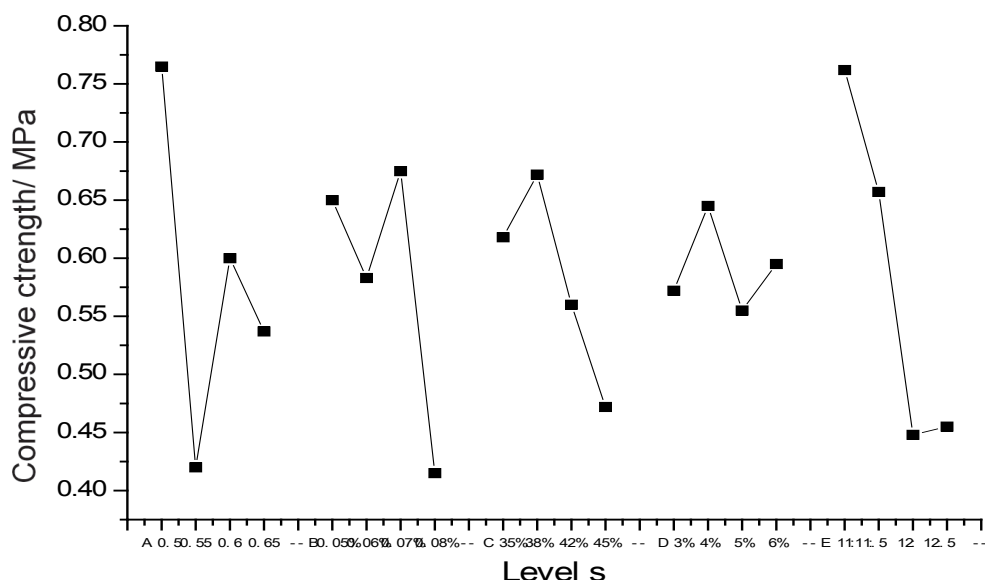
3.2. Ortogonalny plan doświadczenia

W tej pracy wpływ powtarzalności i stopnia istotności udziału mieszanych składników na wytrzymałość na ściskanie betonu komórkowego badano przy wykorzystaniu ortogonalnego planu doświadczenia. Stosunek wody do spoiwa, zawartość dodatku porotwórczego, piasku kwarcowego, gipsu, stosunek zawartości cementu do wapna, zostały wybrane jako pięć głównych czynników. Wybrano cztery poziomy dla każdego czynnika. Badania zostały ustawione zgodnie z planem ortogonalnym [L₁₆(4)] (5). Wytrzymałość na ściskanie i przewodność cieplna betonu komórkowego wybrano jako właściwości docelowe. Na tej podstawie ustalono korzystny

sive strength of aerated concrete is studied with the orthogonal experimental design. The ratio of water to ingredients, the content of foaming agent, silica sand, gypsum, the content ratio of cement to lime are identified as five main influencing factors. Four levels of the factors are selected. So this experiment is arranged according to orthogonal layout [L₁₆(4)] (5). The maximal values of the compressive strength and thermal conductivity of aerated concrete are the target values. On this basis the mix proportion of aerated concrete is optimized. The investigated level of the factors is shown in Table 2 and the orthogonal table is presented in Table 3.

3.2.1. Analysis of resulting curves

The expected curves of the factors level impact on the aerated concrete compressive strength and thermal conductivity of aerated concrete are presented in Fig. 1.



Rys. 1. Wpływ poziomów czynników na wytrzymałość na ściskanie betonu komórkowego

Fig. 1. Influence of factors level on the compressive strength of aerated concrete; the curves order is the same as in Table 3

skład mieszanki betonu komórkowego. Poziomy wpływ czynników w ortogonalnym planie doświadczenia pokazano w tablicy 2, a schematyczny plan ortogonalny w tablicy 3.

3.2.1. Analiza wyników krzywych

Oczekiwane krzywe poziomu wpływu czynników na wytrzymałość na ściskanie oraz przewodnictwo cieplne betonu komórkowego pokazano na rysunku 1.

Wyznaczono optymalną wartość dla każdego poziomu jako najwyższą wytrzymałość na ściskanie, w przypadku każdego czynnika. Na tej podstawie otrzymano najkorzystniejszy skład mieszanki: proszek glinowy, piasek krzemionkowy, gips = 0,07%, 38%, 4%. Stosunek wody do spoiwa wynosi 0,50, a stosunek zawartości cementu do wapna wynosi 1:1. Takiego składu mieszanki brak na liście ortogonalnej. Trzeba więc prowadzić dalej doświadczenie. Ten wynik stanowi także sprawdzenie słuszności planu eksperymentalnego.

W artykule omówiono wpływ stosunku wody do spoiwa na wytrzymałość na ściskanie betonu komórkowego. Stosunek ten wpływa na przebieg procesu i strukturę porów w betonie komórkowym. Woda nie tylko bierze udział w reakcjach składników mieszanki lecz także wpływa na konsystencję zaczynu i oddziałuje na szybkość powstawania porów. Gdy stosunek wody do spoiwa jest prawidłowy, szybkość tężenia dobrze odpowiada procesowi powstawania porów i ten ostatni przebiega płynnie ze względu na małe opory. Gdy stosunek wody do spoiwa jest za mały, szybkość tężenia zaczynu będzie większa od tempa powstawania porów. Będzie powstawać mało porów w związku z oporami, na które natrafia ten proces. Jednak, jeżeli stosunek wody do spoiwa jest za duży to lepkość plastyczna zaczynu jest niska i opory zaczynu są małe. Banieczki wykazują tendencję do łączenia się w większe, a nawet

The optimum value of every level is determined by the highest compressive strength for each factor. On this basis the optimum mix proportion is obtained: aluminum powder: silica sand: gypsum: = 0.07%, 38%, 4%. The ratio of water to binder is 0.50 and the content ratio of cement to lime was 1:1. This mix proportion does not appear in the orthogonal list. So, it should be tested further. This result also verifies the representativeness of the orthogonal experimental design.

The influence of the ratio of water to binder on the compressive strength of aerated concrete is discussed in this paper. The ratio of water to binder affects the process performance and pore structure of aerated concrete. Water not only takes part in the reactions of mix components, but also adjusts the consistency of paste and

affects the foaming rate. When the ratio of water to binder is proper, the thickening rate matches with the foaming process and the last one is fluent due to the little resistance. When the ratio of water to binder is too low, the thickening rate of paste will be higher than the foaming rate. Little pores are produced due to the resisted foaming process. However, when the ratio of water to binder is too high, the consistency of paste is small and the resistance of the paste is small. The bubbles have the tendency to combine one another and get larger constantly and even escapes from the paste during rising, from the bottom to the surface of paste. According to the Laplace's equation, gas pressure of air bubbles is:

$$p = p_a + 4\sigma/r \quad [1]$$

where p_a is the atmospheric pressure (Pa), σ is coefficient of surface tension (N/m), r is the radius of the air bubble (m).

From the Laplace's equation, we know that the pressure of air bubble depends on its radius and surface tension. If the radius of two adjacent bubbles is different, the pressure p is also different. Then the small air bubble will be pressed into the big one and a bigger air bubbles will be formed. So the number of pores formed by aluminum powder becomes less and the compressive strength will increase. On the other hand, when the ratio of water to binder is too high, excess water in the paste will form pores. The pores induce the formation of region of stress concentration that reduces the compressive strength. In other words, the influence of the ratio of water to binder on the compressive strength of aerated concrete is a result of multiple factors.

3.2.2. Range analysis

The range analysis resulting of the orthogonal experimental design is listed in the Table 4. K_i means the average value of the results

Tablica 4 / Table 4

ZAKRES ANALIZY WYNIKAJĄCY Z ORTOGONALNEGO PLANU DOŚWIADCZENIA

RANGE ANALYSIS RESULTING OF THE ORTHOGONAL EXPERIMENTA

	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa				
	A	B	C	D	E
K1	0.765	0.650	0.618	0.572	0.762
K2	0.420	0.583	0.672	0.645	0.657
K3	0.600	0.675	0.560	0.555	0.448
K4	0.537	0.415	0.472	0.595	0.455
Zakres analizy Range analysis	0.345	0.260	0.200	0.118	0.314
Wartość optymalna Optimum value	A1	B3	C2	D2	E1

wydostają się z zaczynu, przemieszczając się z głębokich warstw na powierzchnię zaczynu. Zgodnie z prawem Laplace'a ciśnienie gazu w banieczce powietrza można wyrazić wzorem:

$$p = p_a + 4\sigma/r \quad [1]$$

gdzie: p_a – ciśnienie atmosferyczne, Pa; σ – napięcie powierzchniowe, N/m; r – promień bańki powietrznej, m

Z równania Laplace'a wynika, że ciśnienie w banieczce powietrza zależy od jej promienia i napięcia powierzchniowego. Gdy promienie dwóch sąsiednich banieczek są różne, to ciśnienie p będzie również różne. Małe banieczki będą nietrwałe i będą zanikać przechodząc w duże. W związku z tym liczba porów utworzonych przez proszek glinowy będzie mniejsza i wytrzymałość na ściskanie będzie większa. Z drugiej strony gdy stosunek wody do spoiwa będzie za duży to nadmiar wody w zaczynie będzie zwiększał ilość porów. Pory powodują powstawanie obszarów, w których zachodzi koncentracja naprężeń co zmniejsza wytrzymałość na ściskanie. Jednym słowem wpływ stosunku wody do spoiwa na wytrzymałość na ściskanie w betonie komórkowym zależy od wielu czynników.

3.2.2. Analiza zakresu zmienności czynników

Zakres zmienności czynników wynikający z ortogonalnego planu doświadczenia podano w tablicy 4. K_i oznacza średnią wartość wyników wpływu różnych czynników (A, B, C, D, E) na przyjętym poziomie ich wartości ($i = 1, 2, 3, 4$).

Z tablicy 4 możemy wyciągnąć następujące wnioski:

- 1) Kolejność wpływu różnych czynników na wytrzymałość na ściskanie jest następująca: AEBCD. Oznacza to, że stosunek wody do spoiwa ma największy wpływ na wytrzymałość, a następnym czynnikiem jest stosunek cementu do wapna.
- 2) Potwierdzenie optymalnych wartości różnych czynników. Czynnikiem A ma przeważający wpływ; A1 jest wartością najkorzystniejszą dla wytrzymałości na ściskanie. Drugim czynnikiem jest B. B3 jest wartością optymalną z punktu widzenia wytrzymałości

of various factors influence (A, B, C, D, E) under the adopted level i ($i = 1, 2, 3, 4$).

We can get the following conclusions of the Table 4:

- 1) The influence sequence of various factors on indexes is AEBCD for the compressive strength. That means that the ratio of water to binder has the highest influence on the compressive strength, and the next one is the content ratio of cement to lime.
- 2) The confirmation of optimum level of various factors. The factor A is in a prevailing position, A1 is the optimum value for compressive strength. The second factor is B. B3 is the optimum value for the compressive strength. Then, C2, D3 and E1 are selected respectively according to the same analysis method.
- 3) The best combination is A1B3C2D3E1. So, the optimal mixture composition is the following: aluminum powder: silica sand: gypsum = 0.07%, 38%, 4%; the ratio of water to binder is 0.50; the content ratio of cement and lime is 1:1. It can be seen that the range analysis result is in accordance with the analysis result of resulting curves.

3.2.3. Analysis of variance

Analysis of variance denotes the sequence of various factors on indexes with the range value. This method is simple and intuitive by selecting the optimum level of various factors as the optimum choice. However, this method does not distinguish rigidly the fluctuant data induced by experimental error. Variance analysis method denotes deviation by the quadratic sum of deviation instead of deviation, and is analysing the influence of influencing factors and errors of calculation. The results of variance analysis arising of the orthogonal experimental design are shown in Table 5.

Based on the variance analysis theory of orthogonal experimental design, we can estimate the level of significance of various factors by comparing the calculated F and the theoretical critical value.

The calculation results of the quadratic sum of deviation indicate that the experimental error of compressive strength is little. The calculated F value is lower than the value in the distributing list of F. When $\alpha=0.25$, $F_{0.25}(3, 15) = 1.52$, F (the content ratio of cement to lime) is 1.764 which is larger than 1.52. So, the influence of various factors on the compressive strength is not great. The influence of the content ratio of cement to lime is the greatest of all influencing factors, followed by the ratio of water to binder. The results of range analysis indicate that the influence of the ratio of water to binder is the most important, followed by the content ratio of cement to lime. This shows that the results of the variance analysis are close to that of range analysis.

4. Conclusions

- 1) The results of the experiment performed using orthogonal experimental design indicate that the compressive strength of aerated concrete is the highest when aluminum powder: silica sand: gypsum: cement/lime = 0.07%, 38%, 4%, the ratio of

Tablica 5 / Table 5

ANALIZA WARIANCJI WYNIKÓW WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE

ANALYSIS OF VARIANCE OF THE COMPRESSIVE STRENGTH RESULTS

Czynnik Factor	Suma kwadratów odczyteń Quadratic sum of deviation	Stopień swobody Degree of freedom	Udział Ratio of F	Krytyczna wartość Critical value of F	Istotność Significance
Stosunek wody do spoiwa The ratio of water to binder	0.248	3	1.509	F0.25 = 1.52 F0.1 = 2.49 F0.05 = 3.290 0	Czynnik nie jest istotny The factor is not significant
Proszek glinowy Aluminum Powder	0.165	3	1.004		Czynnik nie jest istotny The factor is not significant
Piasek kwarcowy Silica sand	0.088	3	0.535		Czynnik nie jest istotny The factor is not significant
Gips Gypsum	0.031	3	0.189		
Stosunek zawartości cementu do wapna The content ratio of cement to lime	0.290	3	1.764	F0.01 = 5.42	Czynnik nie jest istotny przy stop- niu istotności $\alpha = 0,25$. Czynnik ma wpływ The factor is significant at the level $\alpha = 0.25$. The factor has the influence
Błąd Error	0.82	15			

na ściskanie. Następnie C2, D3 i E1 zostały wybrane zgodnie z tą samą metodą analizy.

- 3) Najlepszą kombinacją jest A1B3C2D3E1. W związku z tym, optymalny skład mieszanki jest następujący: proszek glinowy: piasku krzemionkowego: gipsu = 0,07%; 38%; 4%; stosunek wody do spoiwa 0,50; stosunek zawartości cementu do wapna 1:1. Można stwierdzić, że analiza udziałów składników zgadza się z analizą opartą na krzywych wynikowych.

3.2.3. Analiza wariancji

Analiza wariancji wyznacza kolejność różnych czynników i wielkość ich udziałów. Metoda ta jest prosta i pozwala na najkorzystniejszy wybór optymalnego poziomu różnych czynników. Jednak metoda ta nie rozróżnia ściśle wahań spowodowanych błędami doświadczalnymi. Analiza wariancji wyznacza odchylenia w postaci sumy kwadratów odchyleń oraz analizuje wpływ decydujących czynników i błędy obliczeniowe. Wyniki analizy wariancji ortogonalnego planu doświadczenia pokazano w tablicy 5.

W oparciu o analizę wariancji ortogonalnego planu doświadczenia możemy ocenić stopień istotności różnych czynników porównując obliczony F i teoretyczną wartość krytyczną. Wyniki obliczeń sumy kwadratów odchyleń pokazują, że błąd pomiarów wytrzymałości na ściskanie jest mały. Obliczona wartość F jest mniejsza niż wartość F na liście rozkładu. Gdy $\alpha = 0,25$ $F_{0,25}(3, 15) = 1,52$, F (stosunek zawartości cementu do wapna) jest 1,746 co jest większe od 1,52. Tak więc, wpływ różnych czynników na wytrzymałość na ściskanie nie jest duży. Wpływ stosunku zawartości cementu do wapna jest czynnikiem o największym wpływie, a następnym jest stosunek wody do spoiwa. Wyniki analizy zakresu zmienności czynników wykazują, że wpływ stosunku wody do spoiwa jest największy, a następnie stosunek zawartości cemen-

water to binder is 0.50 and the content ratio of cement to lime is 1:1.

- 2) The results of range analysis of orthogonal experiment design indicate that the influence of the ratio of water to binder on compressive strength of aerate concrete is the most important, followed by the content ratio of cement to lime. The optimal mixture composition of aerate concrete obtained by range analysis method is the same that obtained from the analysis of curves on Fig. 1.
- 3) The results of variance analysis of the orthogonal experimental design indicate that the ratio of water to binder and the mixture composition are not significant influencing factors. The content ratio of cement to lime has an effect on the compressive strength of aerated concrete, followed by the ratio of water to binder. The ratio of water to binder has high influence on the correctness of the process and pore structure of aerated concrete. Consequently, it affects the compressive strength of aerated concrete.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support for this research from 11th Five Year Key Program for Science and Technology Development of China (2007BA000875-04), the National Natural Science Foundation of China (50808042) for youths, Six Projects Sponsoring Talent Summits of Jiangsu Province (1112000053), and Key Laboratory of C&PC Structures, Ministry of Education.

tu do wapna. To pokazuje, że wyniki, analizy wariancji zbiegają się z analizą zakresu zmienności czynników.

4. Wnioski

- 1) Wyniki analizy uzyskane w wyniku ortogonalnego planu doświadczenia wykazują, że wytrzymałość na ściskanie betonu komórkowego jest najlepsza gdy udziały proszku glinowego, piasku kwarcowego, gipsu i stosunku cement/wapno kolejno wynoszą: 0,07%; 38%; 4%; stosunek wody do spoiwa 0,50, a stosunek cementu do wapna 1:1.
- 2) Wyniki analizy zakresu zmienności czynników oparte na ortogonalnym planie doświadczenia pokazują, że wpływ stosunku wody do spoiwa na wytrzymałość na ściskanie betonu komórkowego jest największy, a następnie stosunek zawartości cementu do wapna. Optymalny skład mieszanki betonu komórkowego wynikający z analizy zakresu zmienności czynników jest taki sam, jak otrzymany z oceny przebiegu krzywych, pokazanych na rysunku 1.
- 3) Analiza wariancji wyników doświadczenia pokazuje, że stosunek wody do spoiwa i skład mieszanki nie są istotnymi czynnikami. Stosunek zawartości cementu do wapna wpływa na wytrzymałość na ściskanie betonu komórkowego, a drugim jest stosunek wody do spoiwa. Ten ostatni ma duży wpływ na prawidłowość przebiegu procesu i strukturę porowatości betonu komórkowego. W związku z tym wpływa on na wytrzymałość betonu komórkowego.

Literatura / References

1. Guide for precast cellular concrete—floor, roof, and wall units ACI 523.2R-96. American Concrete Institute, Cellular Concrete Committee 523, 1996.
2. F. De Larrard, T. Sedran, Mixture proportioning of high-performance concrete. *Cem. Concr. Res.*, **32**, 1699–1704 (2002).
3. C. Hanecka, O. Koronthalyova, P. Matiasovsky, The carbonation of autoclaved aerated concrete. *Cem. Concr. Res.*, **27**, 589-599 (1997).
4. N. Isu, H. Ishida, T. Mitsuda, Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete-tobermorite formation. *Cem. Concr. Res.*, **25**, 243-251 (1995).
5. I. Odler, M. Robler, Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes: Effect of pore structure and degree of hydration. *Cem. Concr. Res.*, **15**, 401-411 (1985).
6. E. Holta, P. Raivio, Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete. *Cem. Concr. Res.*, **35**, 796– 802 (2005).
7. M. Albayraka, A. Yorukoglu et al. Influence of zeolite additive on properties of autoclaved aerated concrete. *Building and Environment*, **42**, 3161–3165 (2007).
8. Z. Wu, Development and application of fly-ash housing materials. Beijing: China building material industry publishing house, 2003 (in Chinese).
9. J. Zhang, Effect of Floating Pellet on Strength of Areocrete Product, *Coal Ash*, **3**, 30-31 (2009) (in Chinese).
10. P. Ren, Y. Bai, et. al. Thermal performance of composite wall of lime sand brick and aerated concrete brick, *New Building Material*, **6**, 17-19 (2007) (in Chinese).
11. R. Xia, M. Zhu, Experimental study on making aerated concrete by railings of gold mine, *New Building Material*, **1**, 22-25 (2008) (in Chinese).
12. K. Fang, C. Ma, Orthogonal experimental and Uniform experimental design. Beijing: Science Press (2001) (in Chinese).
13. C. Pang, H. Qin, et. al. Experimental design and nondestructive detection technique of concrete. China Building Material Industry Publishing House, 2006 (in Chinese).