

Czynniki wpływające na szybkość propagacji fal ultradźwiękowych w betonie narażonym na działanie ognia

Factors influencing the propagation velocity of ultrasonic waves in concrete exposed to fire

1. Wprowadzenie

Wytrzymałość betonu jest stosowana w celu oceny jego właściwości, natomiast metoda ultradźwiękowa jest jedną z nieniszczących metod badawczych (1-4). W 1949 Leslide i Cheesman (15), a także Jones i Gatfield (16) pierwsi zastosowali pomiary rozchodzenia się impulsów ultradźwiękowych do badania wytrzymałości betonu i rozpoczęli nowy obszar takich badań. Metoda ultradźwiękowa jest obecnie szeroko stosowana w Chinach w inżynierii materiałowej. „Metoda dotycząca badania wytrzymałości betonu za pomocą pomiaru odbicia fal ultradźwiękowych” (CECS 02:2005) pozwoliła na ustalenie odpowiednich krzywych wytrzymałości i wzoru do obliczenia wytrzymałości na ściskanie.

Struktura i właściwości materiału ulegają zmianie pod wpływem oddziaływania ognia, w wyniku czego nośność poszczególnych elementów betonowych oraz całej konstrukcji ulega zmniejszeniu (5-7). W związku z tym zbadanie resztkowej wytrzymałości betonu po działaniu ognia jest bardzo ważne. Ocena szkody, oraz naprawa zbrojenia i całej konstrukcji betonowej powinna być przeprowadzana możliwie szybko (8-9). Jednak, doświadczalna krzywa wytrzymałości zalecana w CECS 02:2005 nie może być zastosowana do betonu, który przeszedł działanie ognia, ponieważ zależność pomiędzy szybkością fal ultradźwiękowych i wytrzymałością na ściskanie jest zniekształcona przez to działanie. Metoda opisana w CECS 02:2005 nie nadaje się więc do oszacowania wytrzymałości na ściskanie betonu poddanego działaniu ognia.

Szybkość propagacji fal ultradźwiękowych w betonie jest związana ze sprężystością i strukturą wewnętrzną. Gdy fala ultradźwiękowa przechodzi w trakcie propagacji przez odkształcenie, jej droga ulega zmianie. Fala o niskiej częstotliwości ominie to odkształcenie, co pociągnie za sobą wydłużenie drogi i w konsekwencji mniejszą obliczoną szybkość ultradźwięków.

Po poddaniu betonu działaniu ekstremalnych temperatur jego struktura ulega zmianom, na przykład zaczyn cementowy traci spójność, pojawiają się spękania, a istniejące ulegają rozszerzeniu (10). Te zmiany powodują spadek szybkości fal ultradźwiękowych.

1. Introduction

Concrete strength is used to evaluate concrete structures, and the ultrasonic method is one nondestructive testing method (1-4). In 1949, Leslide and Cheesman (15) as well as Jones and Gatfield (16) were the first who applied the ultrasonic pulse measurement technique to test concrete strength and initiated a new field of ultrasonic testing. The ultrasonic method is now widely used in concrete engineering in China: “Technical specification for detecting strength of concrete by ultrasonic-rebound combined method” (CECS 02:2005), appropriate testing strength curves and a formula to calculate compressive strength have been established.

Structure and material performances vary after the exposure to fire, consequently the carrying capacity of concrete members and the whole structure is reduced (5-7). Therefore, examining the residual compressive strength of concrete after fire is very important. The damage evaluation, reinforcement, and concrete structure repair should be done soon after a fire (8-9). However, the testing strength curve prescribed in CECS 02:2005 is not applicable for the fire-exposed concrete because the relationship between ultrasonic velocity and compressive strength is altered after the fire event. The technical specifications provided in CECS 02:2005 are thus not suitable for estimating compressive strength of concrete exposed to a fire.

The propagation velocity of ultrasonic waves in concrete is related to the elasticity and interior structure. When the ultrasonic wave falls across a disfiguration during propagation, its route will vary. The low frequency wave will go round the disfiguration, resulting in a longer propagation path and lower calculated value of ultrasonic velocity. After the exposure of concrete to extreme temperatures, the interior structure takes on different characteristics, for example, porosity of cement paste is largely increased, the new cracks are formed, and the existing ones are enlarged (10). These variations induce a drop in the ultrasonic velocity. The degree of concrete damage after fire can be evaluated by the following method. First, the ultrasonic velocity of concrete is measured by on-site testing,

Stopień zniszczenia betonu pod działaniem ognia może być oszacowany za pomocą następujących metod. Po pierwsze, mierzy się na miejscu szybkość fal ultradźwiękowych, a następnie oblicza się wytrzymałość na ściskanie przy wykorzystaniu krzywej względnej resztkowej wytrzymałości na ściskanie i względnej szybkości fal ultradźwiękowych (11-13). Kluczem do zastosowania tej metody jest ustalenie dobrej zależności krzywej resztkowej wytrzymałości betonu na ściskanie i szybkości fali ultradźwiękowej. Do dzisiaj nie ma także w Chinach innych znormalizowanych metod do badania narażonych na działanie ognia betonów.

W pracy opracowano na podstawie licznych pomiarów metodę otrzymywania odpowiedniej krzywej oraz wzór na obliczenie wytrzymałości na ściskanie betonu poddanego działaniu ognia. Zbadano także wpływ wytrzymałości na ściskanie betonu, rodzaju kruszywa, dodatków, wilgotności betonu, włókien i wymiaru próbek na zależność szybkości fali ultradźwiękowej i resztkowej wytrzymałości. Wyniki te stanowią podstawę do ustanowienia metody oceny konstrukcji betonowych narażonych na działanie ognia.

2. Doświadczenia

2.1. Surowce i metody

W pracy zastosowano następujące materiały: cement portlandzki 42,5 P II zgodnie z chińską normą GB 175-1999, piasek rzeczny o punkcie piaskowym 26% i gęstości 2,65 g/cm³, wapień po kruszarce o ciągłym uziarnieniu od 5 do 20 mm, popiół lotny zgodny z normą chińską GB 1596-91, domieszkę upłynniającą o dużej skuteczności, włókna 30 μm i metakaolin (M). Zastosowano następujące klasy betonu: C25, C30, C40, C50, C60, C70, C80 i C90. Skład mieszanek betonowych podano w tablicy 1.

W celu przeprowadzenia doświadczeń w wysokiej temperaturze stosowano piec opalany olejem. Jego krzywa wzrostu temperatury jest podana w pracy doktorskiej (14); jest ona bardzo podobna do standardowej krzywej temperaturowej zalecanej przez normę badania na działanie ognia budowlanych elementów konstrukcyjnych GB/T 9978-1999. Próbki dojrzewały przez 28 dni w powietrzu o temperaturze 20°C i wilgotności względnej 90%, a następnie przez 3 dni w warunkach laboratoryjnych, po czym umieszcza-

and then the relative compressive strength is calculated using the curve of the relative residual compressive strength and of the relative ultrasonic velocity (11-13). The key for this method consists in setting up the exact relation curve of residual compressive strength of concrete and the ultrasonic velocity. Currently, there are no testing standards applying destructive methods for testing of fire-exposed concrete in China.

In this work, the appropriate curve and the calculation formula for estimating the compressive strength of concrete after exposure to fire are established on the basis of numerous experiments. The effects of compressive strength, aggregate type, used additive, humidity of concrete, fiber type, and specimen size are taken into account to modify the relationship between ultrasonic velocity and residual compressive strength. These results provide the basis to establish the technical specifications for the evaluation of concrete structures exposed to fire.

2. Experimental

2.1. Raw materials and methods

The materials used in this study were 42.5 P II Portland cement according to the Chinese standard GB175-1999, river sand with a fineness modulus of 2.60 and a density of 2.65 g/cm³; crushed limestone with continuous grading in the range of 5~20 mm; grade I fly ash according to the Chinese standard GB1596-91; a superplasticizer and polypropylene fiber with a density of 0.91 g/cm³ and a diameter of 30 μm; and metakaoline (M). The class concretes used were C25, C30, C40, C50, C60, C70, C80 and C90 respectively. The concrete mix compositions are listed in Table 1.

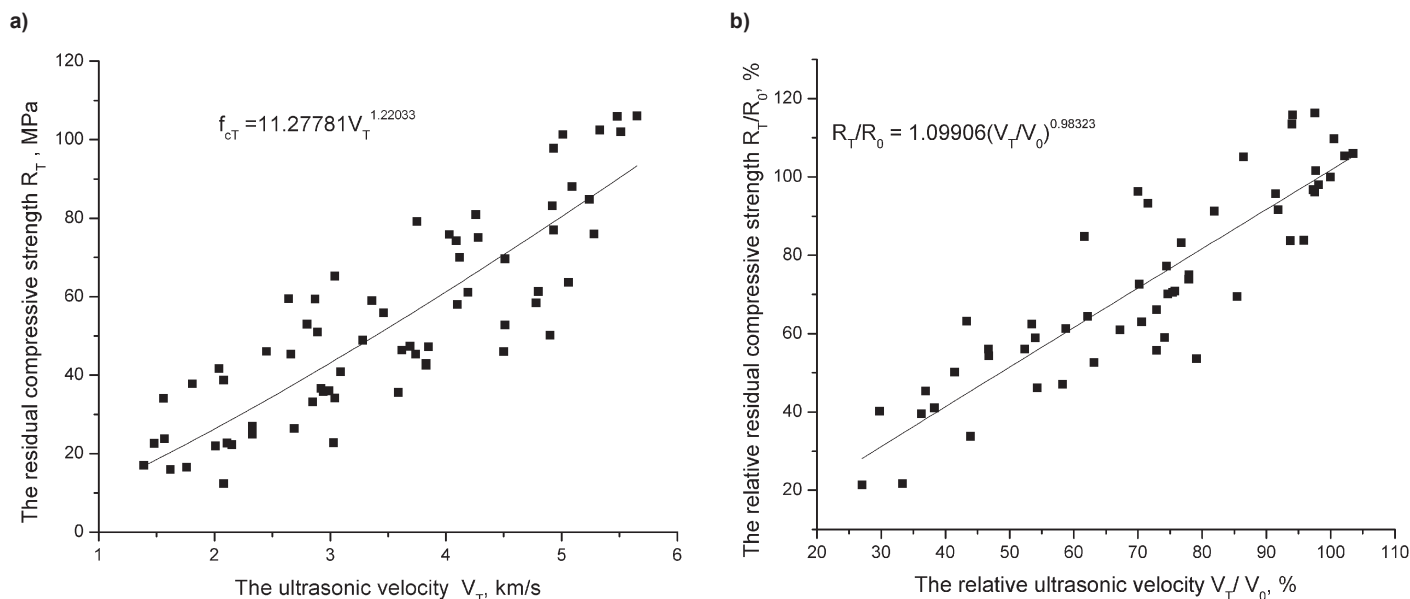
An oil-burning furnace was used for the high temperature experiments. Its temperature-time curve is given in Ref. (14), and is very similar to the standard temperature curve prescribed in the Elements of Building Construction (GB/T9978-1999) fire-resistance test. The samples, after hardening for 28 days at 20°C and 90% RH, were cured in ambient conditions for 3 days, and then placed in an oil-burning furnace. When the temperature inside the furnace reached the set temperature, the specimens were heated again in

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH, kg/m³

THE CONCRETE MIX COMPOSITION, kg/m³

Series	cement	water	sand	aggregate	Fly ash	Water reducer	w/c ratio
NSC-25	291	195	766	1148	–	–	0.67
NSC-30	382	195	639	1184	–	–	0.51
NSC-40	368	195	656	1165	–	–	0.53
HSC-50	327	144	638	1182	109	3.49	0.44
HSC-60	487	172	679	1012	86	4.87	0.35
HSC-70	410	146	628	1116	150	4.10	0.36
HSC-80	470	125	643	1196	80	3.29	0.27
HSC-90	450.	138	581	1180	150	4.8	0.31



Rys. 1. Krzywa szybkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych a) i względnej szybkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych b) w betonie poddanym działaniu ognia

Fig. 1. The ultrasonic curve of concrete after fire exposure

no je w piecu opalanym olejem. Po osiągnięciu przez piec założonej temperatury próbki wygrzewano jeszcze przez 1 godzinę. Następnie zatrzymywano ogrzewanie i próbki pozostawiano w piecu aż do ochłodzenia, do temperatury pokojowej.

Do badania wytrzymałości stosowano maszynę TY1-3000 oraz aparat NM-4B do badania szybkości fal ultradźwiękowych. Pomiar szybkości fal ultradźwiękowych przeprowadzano zgodnie z podaną już metodą CECS 02:2005.

3. Wyniki doświadczeń i ich omówienie

3.1. Krzywa szybkości rozchodzenia się ultradźwięków w betonie wystawionym na działanie ognia

Wykorzystano pomiary szybkości fal ultradźwiękowych i wytrzymałości na ściskanie dużej liczby próbek betonowych w celu uzyskania zależności pomiędzy resztkową wytrzymałością na ściskanie (R_T) i szybkością fal ultradźwiękowych (V_T), jak również zależności względnej resztkowej wytrzymałości na ściskanie (R_T/R_0) i względnej szybkości fal ultradźwiękowych (V_T/V_0). Wyniki pokazano na rysunku 1. Względna szybkość fali ultradźwiękowej jest określona jako udział procentowy tej szybkości w betonie poddanym działaniu ognia do szybkości w betonie dojrzewającym w normalnej temperaturze. Do oceny stopnia zniszczenia poddanego działaniu ognia betonu, zastosowano stopień zmniejszenia wytrzymałości tego kompozytu na ściskanie, wykorzystując do tego celu względną wytrzymałość na ściskanie i względną szybkość ultradźwięków. W celu zmniejszenia błędów pomiarowych szybkości ultradźwiękowej fali, tej metody nie należy stosować w następujących przypadkach:

(1) W betonie występują duże ziarna kruszywa, co powoduje znacznie zniekształcenia i pustki.

this condition for 1 h. The heating was then stopped and specimens were cooled to room temperature in the furnace.

The TY1-3000 tupe pressure machine and the NM-4B type nonmetallic ultrasonic velocity tester were used for compressive strength and ultrasonic velocity tests, respectively. The ultrasonic velocity tests were performed according to "Technical specification for detecting strength of concrete by ultrasonic-rebound combined method" (CECS 02:2005).

3. Results and discussion

3.1. The ultrasonic curve of concrete exposed to fire

Ultrasonic velocity and compressive strength tests of a large number of concrete samples are used to establish the relationship between residual compressive strength (R_T) and ultrasonic velocity (V_T), as well as the relationships between the relative residual compressive strength (R_T/R_0) and the relative ultrasonic velocity (V_T/V_0). The results are shown in Fig. 1. The relative ultrasonic velocity is defined as the percentage of the ultrasonic velocity of fire-exposed concrete to the ultrasonic velocity of concrete cured at normal temperature. Considering the fact that the main objective of evaluating damage degree of fire-exposed concrete consists in the confirmation of the decline rate of the concrete compressive strength, the relative compressive strength and the relative ultrasonic velocity can be used to reflect this change. To reduce the testing error of ultrasonic velocity, this test should not be used when the following situations appear:

- (1) Coarse aggregate was used in the concrete and there are evident disfigurements and holes.
- (2) Severe concrete spalling and flaking are formed in the exterior of the exposed area.

(2) Pojawiają się duże odspojenia zewnętrznej powierzchni podanej działaniu ognia.

(3) Występują spękania na powierzchni betonu.

Wzory opisujące krzywą pokazaną na rysunku 1 są następujące:

$$R_T = 11,27781 V_T^{1,22033} \quad R^2 = 0,73205 \quad [1]$$

$$R_T/R_0 = 1,09906 (V_T/V_0)^{0,98323} \quad R^2 = 0,78482 \quad [2]$$

3.2. Czynniki wpływające na szybkość fali ultradźwiękowej w betonie poddanym działaniu wysokich temperatur

Dokładność obliczonej wytrzymałości resztkowej na ściskanie betonu poddanego działaniu ognia na podstawie pomiaru szybkości fali ultradźwiękowej jest zależna od wpływających na nią czynników. Są to skład betonu oraz zmiany jego mikrostruktury. Czynniki te powinny być wyeliminowane jako zmienne pomiarowe. Wyniki pomiarów oraz znajomość zagadnienia wynikająca z praktycznego doświadczenia wykazują, że główne czynniki wpływające na szybkość ultradźwięków są następujące: klasa betonu, wymiar kruszywa i jego zawartość, stosunek w/c, skład mieszanki, wiek betonu i warunki jego dojrzewania. W pracy rozpatrzono wpływ wytrzymałości betonu, rodzaju kruszywa, dodatków, stosunku w/c, włókien i wymiarów próbek na szybkość ultradźwięków w betonie poddanym działaniu wysokiej temperatury.

3.2.1. Wpływ wytrzymałości betonu

Na rysunku 2 pokazano szybkość fal ultradźwiękowych i ich względną szybkość w betonie o różnej wytrzymałości na ściskanie, po poddaniu go działaniu ognia. Można stwierdzić, że szybkość ultradźwięków w betonie o wysokiej wytrzymałości jest większa niż w zwykłym betonie, w obu przypadkach poddanych działaniu tej samej temperatury. Szybkość ultradźwięków we wszystkich

(3) Coterminal cracks exist on the exterior of the concrete.

The fitting relations of the curve in Fig. 1 are:

$$R_T = 11,27781 V_T^{1,22033} \quad R^2 = 0,73205 \quad [1]$$

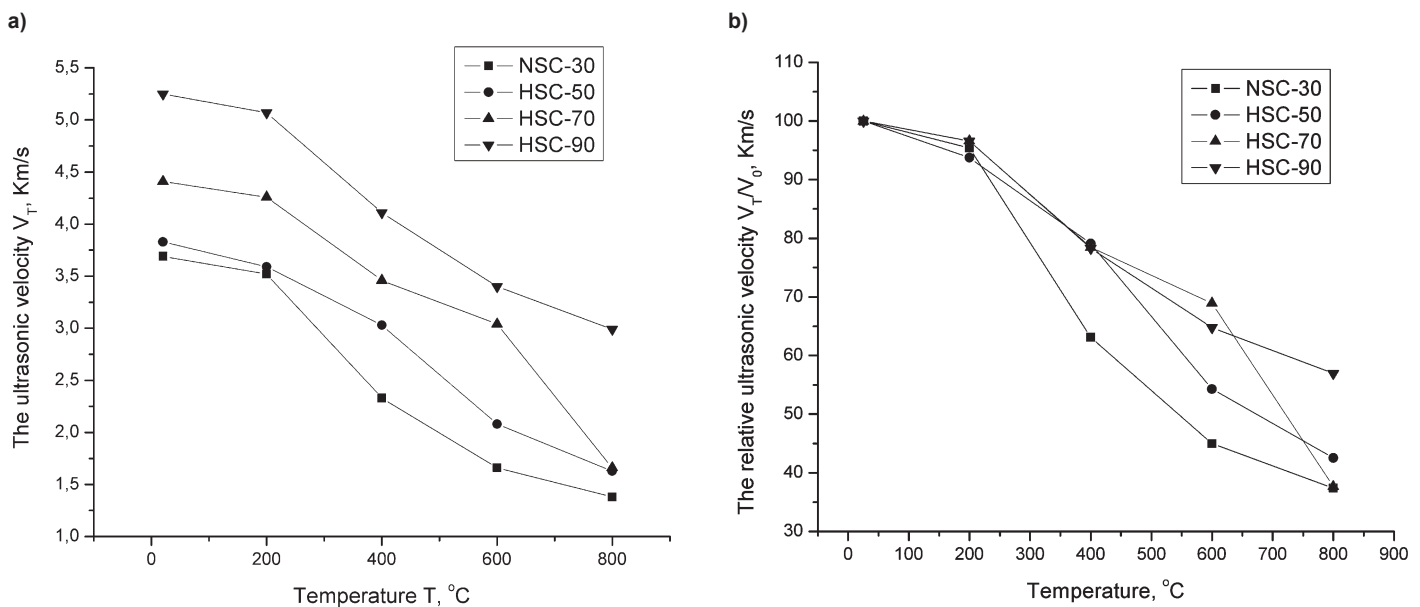
$$R_T/R_0 = 1,09906 (V_T/V_0)^{0,98323} \quad R^2 = 0,78482 \quad [2]$$

3.2. Factors influencing the ultrasonic velocity in concrete exposed to high temperatures

The accuracy of the calculated residual compressive strength of fire-exposed concrete measured by ultrasonic velocity is closely related to the definition of ultrasonic velocity. The ultrasonic velocity is influenced by the concrete materials composition and structural situation. These factors should be eliminated as variables during testing. The results of experiments and practical experience-based knowledge show that the key factors that influence ultrasonic velocity in concrete are its class, aggregate grains diameter and their content, water to cement ratio, mix composition, age of concrete, and curing method. In this paper, the effects of concrete strength, aggregate type, additive, water to cement ratio, fiber addition, and specimen size on ultrasonic velocity in concrete exposed to high temperature are discussed.

3.2.1. Effect of concrete strength

Fig. 2 shows the ultrasonic waves velocity and the relative ultrasonic velocity in concrete with different compressive strengths after its exposure to fire. It can be seen that the ultrasonic velocity in high strength concrete (HSC) is higher than that of normal strength concrete (NSC), exposed at the same temperature. The ultrasonic velocity in all concrete samples drops gradually with increasing temperature, which indicates that their interior structure has been damaged.



Rys. 2. Wpływ wytrzymałości na ściskanie na szybkość fal ultradźwiękowych a) i względną szybkość fal ultradźwiękowych b) w betonie poddanym działaniu wysokich temperatur

Fig. 2. Effect of compressive strength on the ultrasonic waves velocity a) and the relative ultrasonic velocity b) in concrete exposed at high temperature

próbkach betonu spada stopniowo ze wzrostem temperatury co wykazuje, że ich wewnętrzna mikrostruktura została uszkodzona.

Szybkość ultradźwięków w zwykłym betonie podgrzanym do 300°C była mniejsza od 3 km/s, co wskazywało na duże uszkodzenia jego wewnętrznej mikrostruktury. Wewnętrzna mikrostruktura betonu o wysokiej wytrzymałości została uszkodzona tylko w tym przypadku, gdy został on podgrzany do temperatury 500 ~ 600°C. Wielkość spadku szybkości fal ultradźwiękowych w zwykłym betonie jest większa niż w betonie o wysokiej wytrzymałości, gdy temperatura, do której został on podgrzany, przekracza 200°C. Po podgrzaniu betonów zwykłego i o wysokiej wytrzymałości do temperatury wyższej od 200°C występuje szybki spadek względnej szybkości ultradźwięków. Oznacza to, że szybkość uszkodzenia wewnętrznej mikrostruktury betonu wzrasta wraz z temperaturą. Względna szybkość ultradźwięków zmniejsza się szybciej w przypadku betonu o wysokiej wytrzymałości niż betonu zwykłego. Pomimo niewątpliwego związku szybkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych z wytrzymałością betonu na ściskanie nie jest to zależność wprost proporcjonalna.

Zależność szybkości fali ultradźwiękowej od temperatury ekspozycji powinna być skorygowana z uwzględnieniem wpływu wytrzymałości na ściskanie betonu. W pracy wyznaczono współczynnik korekcyjny uwzględniający wytrzymałość betonu na ściskanie, a opierający się na wynikach doświadczalnych. Uzyskaną krzywą dobrze oddającą wyniki pokazane na rysunku 2 (b) opisuje zależność:

$$V_T/V_0 = 105,70371 - 0,077197T \quad R = -0,95084 \quad [3]$$

Współczynnik korekcyjny związany z wytrzymałością betonu na ściskanie może być wyliczony z równania [4] i jego wartość podano w tabelicy 2. Jeżeli wytrzymałość betonu na ściskanie wyrazimy jako medianę podanych wartości, to współczynnik korekcyjny zależny od tej wytrzymałości można wyznaczyć przeprowadzając interpolację.

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_T/V_0)_i / (V_T/V_0)_i^c \quad [4]$$

gdzie: $(V_T/V_0)_i$ jest względną szybkością ultradźwięków w i -tej próbce betonu uzyskanej z pomiarów,

$(V_T/V_0)_i^c$ jest obliczoną z równania [3] wartością względną szybkości fal ultradźwiękowych w i -tej próbce betonu.

Tablica 2 / Table 2

WSPÓŁCZYNNIKI KOREKCYJNE DLA WZGLĘDNEJ SZYBKości ROZCHODZENIA SIĘ FALI ULTRADŹWIĘKOWEJ W BETONIE PODDANYM DZIAŁANIU WYSOKICH TEMPERATUR ORAZ WPŁYW RÓŻNYCH CZYNNIKÓW

THE CORRECTION COEFFICIENTS FOR THE RELATIVE ULTRASONIC VELOCITY OF CONCRETE EXPOSED TO FIRE FOR THE DIFFERENT FACTORS

The influential factors	strength class				aggregate type		Concrete humidity, %			PP fiber		specimen size, mm ³	
	C30	C50	C70	C90	basalt	lime stone	1~1.5	1.5~2	2~2.5	with	without	100	150
correction coefficient	0.895	0.988	1.020	1.093	0.938	1.059	0.977	1.009	1.013	1.001	0.997	1.050	0.954

The ultrasonic velocity of NSC exposed to 300°C was lower than 3 km/s, providing the severe damage of the interior structure. The interior structure of HSC was damaged seriously only when the heating temperature was 500 ~ 600°C. The extent of the decrease in the ultrasonic velocity in NSC is higher than that of HSC when the heating temperature is over 200°C. After NSC and HSC were heated at temperature exceeding 200°C, a rapid decrease of the relative ultrasonic velocity was observed. This means that the rate of damage of the concrete interior structure increases with temperature. The relative ultrasonic velocity in the case of HSC decreases faster than that of NSC. Although there is obviously a relation between ultrasonic velocity and compressive strength of concrete, it is not simply directly proportional.

The relationship between ultrasonic velocity and temperature should be corrected depending of the effects of concrete compressive strength. In this paper the correction coefficient taking into account the concrete compressive strength is determined, basing on experimental results. The fitted curve of the relative ultrasonic velocity and temperature obtained from the experimental data are shown in Fig. 2 b):

$$V_T/V_0 = 105,70371 - 0,077197T \quad R = -0,95084 \quad [3]$$

The correction coefficient related with the concrete compressive strength is calculated from Eq. [4], and the results are listed in Table 2. If the compressive strength is the median of the listed values, the correction coefficient due to the compressive strength can be found by interpolation.

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_T/V_0)_i / (V_T/V_0)_i^c \quad [4]$$

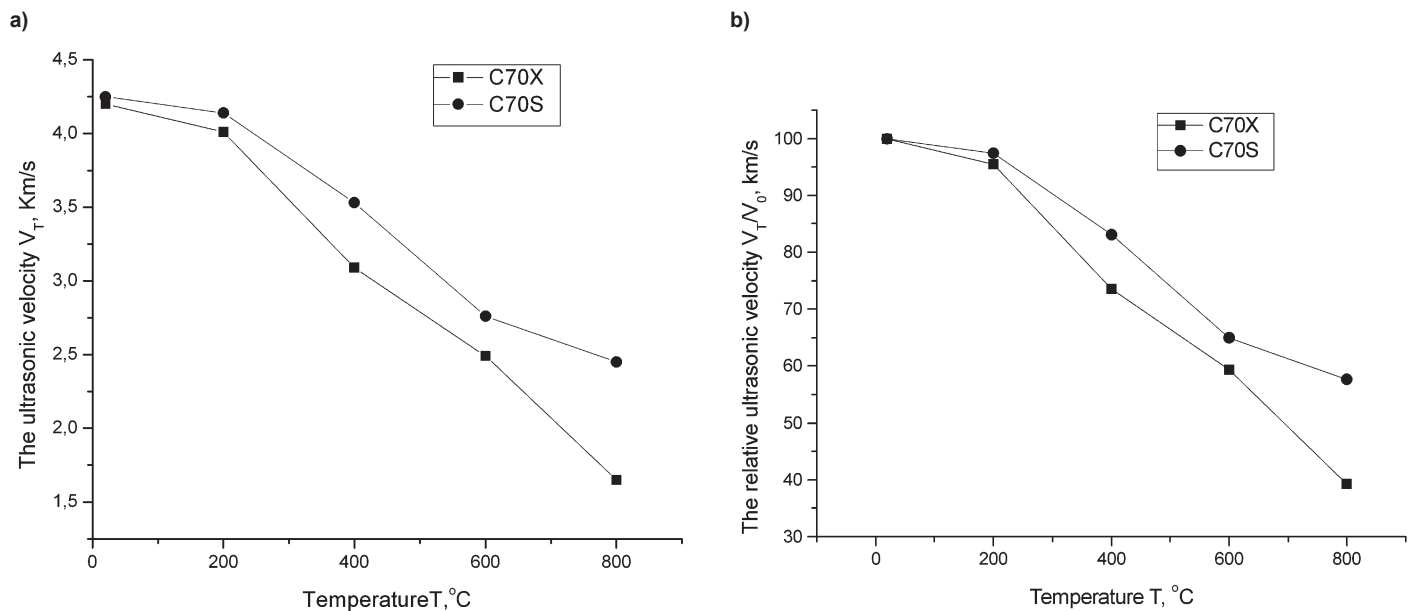
where: $(V_T/V_0)_i$ is the test value of relative ultrasonic velocity of the i th concrete specimen,

$(V_T/V_0)_i^c$ is the calculated value of relative ultrasonic velocity of the i th concrete specimen, according to Eq. [3].

3.2.2. Effect of aggregate type

The ultrasonic velocity and relative ultrasonic velocity in concrete specimens containing basalt or limestone aggregates as a function of temperature are shown in Fig. 3.

The aggregate type affects the ultrasonic velocity in concrete because the propagation velocity of ultrasonic waves through ag-



Rys. 3. Wpływ rodzaju kruszywa na szybkość fal ultradźwiękowych a) i względną szybkość fal ultradźwiękowych b) w betonie podgrzanym do różnych temperatur

Fig. 3. The effect of aggregate type on the ultrasonic waves velocity a) and the relative ultrasonic waves velocity b) in concrete heated to different temperatures, C70S limestone, C70X basalt

3.2.2. Wpływ rodzaju kruszywa

Na rysunku 3 pokazano szybkości fal ultradźwiękowych oraz względną szybkość ultradźwięków w próbkach betonu z kruszywem bazaltowym a także z kruszywem wapiennym jako funkcję temperatury.

Rodzaj kruszywa wpływa na szybkość rozchodzenia się ultradźwięków w betonie, gdyż szybkość ta jest znacznie większa w kruszywie w porównaniu z innymi składnikami, a także ze względu na duży udział grubego kruszywa, który wynosi 75%. Pomimo tego, że szybkości ultradźwięków w próbkach betonu C70X i C70S w normalnej temperaturze są prawie takie same odpowiednio 4,25 km/s i 4,20 km/s, to spadek tej szybkości w próbce C70X jest większy niż w C70S po podgrzaniu do wysokiej temperatury. Ponadto współczynnik przewodności cieplnej, i rozszerzalności cieplnej wapienia oraz stosunek tej ostatniej do rozszerzalności matrycy cementowej są mniejsze niż w przypadku bazaltu. Ilość i rozstaw spękań na powierzchni kruszywa w matrycy jest w przypadku betonu C70S po jego podgrzaniu mniejsza niż betonu C70X i odpowiednio szybkość ultradźwięków w betonie C70X jest większa.

Wyniki szybkości ultradźwięków pokazane na rysunku 3 b) można opisać równaniem w postaci:

$$V_T/V_0 = 105,47197 - 0,0703T, \quad R = -0,96027 \quad [5]$$

Współczynnik korekcyjny dla próbek betonu z kruszywem bazaltowym i wapiennym można wyliczyć z równania [4] i odpowiednie wartości wynoszą 0,938 i 1,059.

3.2.3. Wpływ dodatków mineralnych do betonu

Rozwój technologii betonów o wysokich wytrzymałościach doprowadził do powszechnego stosowania dodatków mineralnych.

gregates is much higher than for other components, furthermore, the proportion of coarse aggregate in concrete is as high as 75%. Although the ultrasonic velocities in C70X and C70S concrete samples at normal temperature are very close (4.25 km/s and 4.20 km/s, respectively), the decrease of velocity in C70X is higher than that in C70S after heating to elevated temperatures. Moreover, the coefficient of heat conductivity, the thermal expansion coefficient of limestone, and the deformation difference of thermal expansion between limestone and cement paste are lower than that of basalt. The quantity and width of cracks in the interface between the aggregate and the hardened cement paste in C70S concrete after heating is less than that in C70X, correspondingly the ultrasonic velocity in C70X is higher.

The relative ultrasonic velocity is correlated with temperature by fitting the data given in Fig. 3 b):

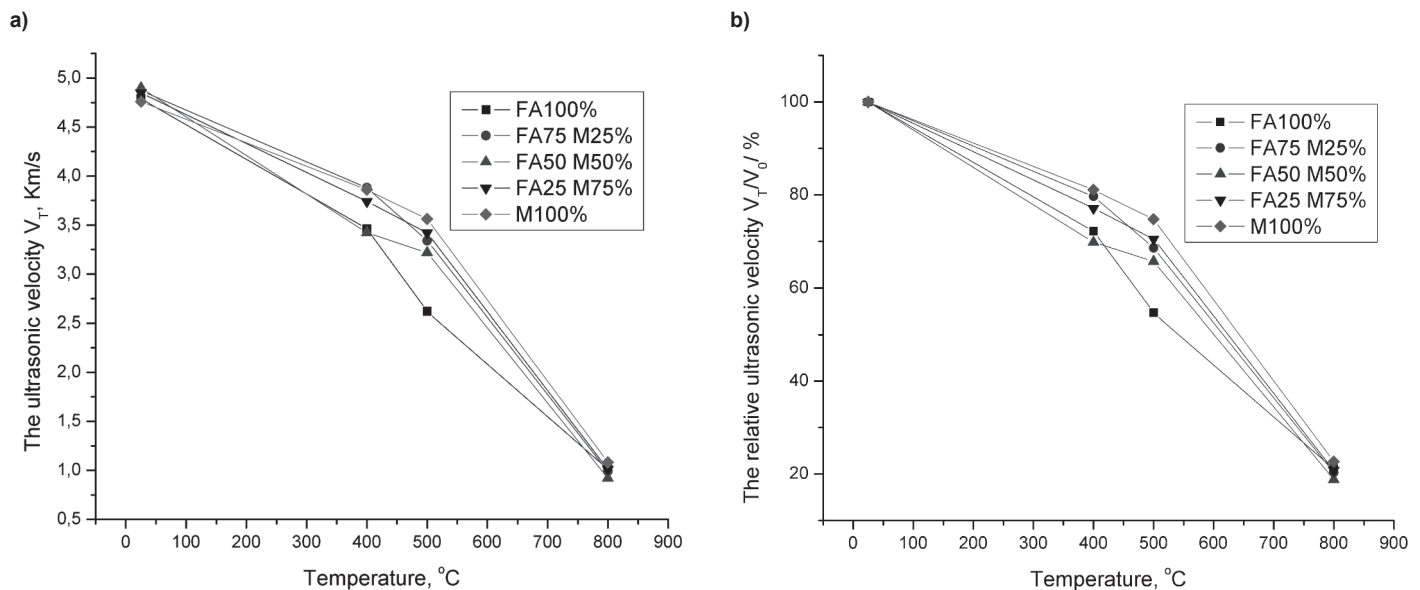
$$V_T/V_0 = 105,47197 - 0,0703T, \quad R = -0,96027 \quad [5]$$

The correction coefficient for the concrete with aggregate type of basalt and limestone is calculated by Eq. [4], and the values are 0.938 and 1.059, respectively.

3.2.3. Effect of concrete additive

With the development of the confecting technology of HSC, mineral additives are widely used. In order to understand the effect of additives on the ultrasonic velocity in concrete after exposure to fire, a part of the fly ash (FA) in C70 was substituted with metakaoline (M) of different mixture quantities and the ultrasonic velocity was tested.

From the curves presented in Fig. 4 it can be seen that the ultrasonic velocity in C70 heated samples increased slightly in the

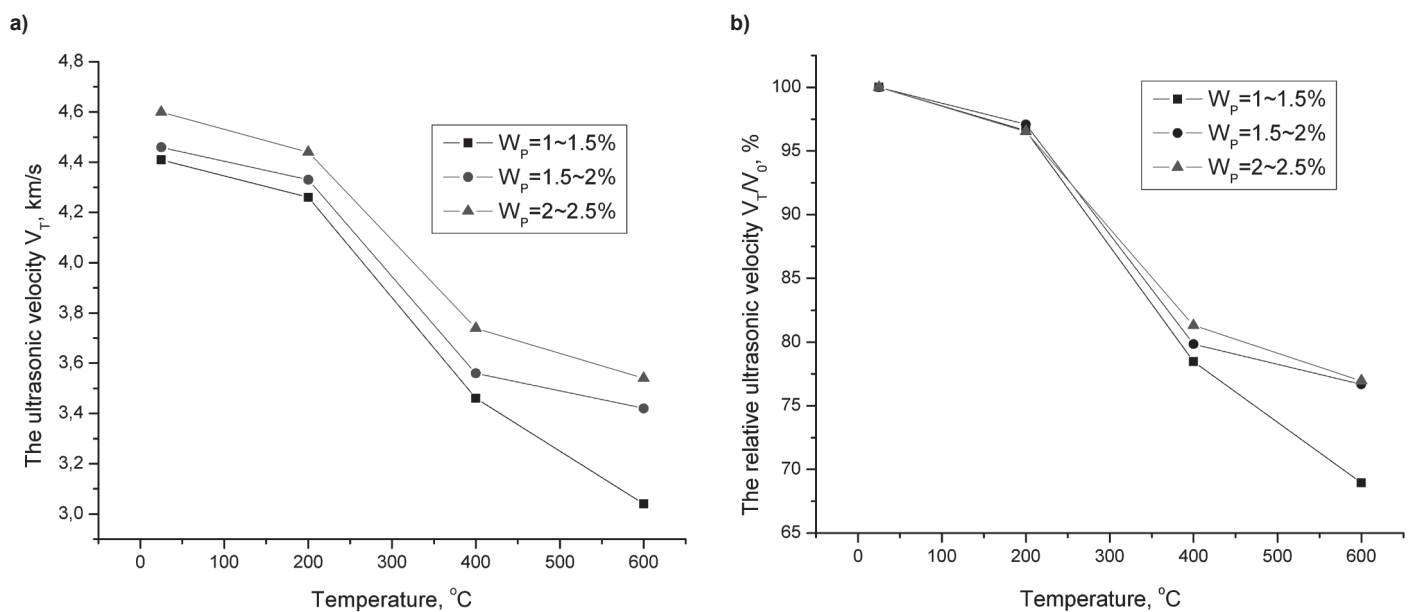


Rys. 4. Wpływ dodatków mineralnych na szybkość ultradźwięków a) i względną szybkość ultradźwięków b) w betonie podgrzany do różnych temperatur
 Fig. 4. Effect of additive on the ultrasonic velocity a) and the relative ultrasonic velocity b) in concrete heated to different temperature

W celu poznania wpływu tych dodatków na szybkość rozchodzenia się ultradźwięków w betonie poddanym działaniu ognia część popiołu lotnego w betonie zastąpiono metakaolinitem w różnym stopniu i przeprowadzono pomiary szybkości fal ultradźwiękowych.

Z krzywych pokazanych na rysunku 4 można wnioskować, że w betonie C70 z dodatkiem metakaolinitu szybkość ultradźwięków w próbkach poddanych działaniu podwyższonej temperatury wzrasta nieznacznie. Jednak nie ma prawie różnic w próbkach C70 z dodatkiem i bez kaolinitu, gdy temperatura wygrzewania przekracza 800°C. Metakaolinit wykazuje aktywność pucolanową i wiąże wodorotlenek wapniowy, co może powodować większą stabilizację mikrostruktury matrycy w związku z utworzeniem uwodnionych krzemianów i glinianów wapniowych. Wodorotlenek wapnia może tworzyć mikropęknięcia podczas odwadniania, podczas gdy żel C-S-H w zaczynie wykazuje skurcz i gęstość matrycy wzra-

case of concrete with metakaoline; however, there is almost no difference in C70 with and without metakaoline when the exposed temperature is over 800°C. Metakaoline is active and may combine with calcium hydroxide, then it produces some stabilization of matrix microstructure by formation of hydrated calcium silicate and aluminate. Calcium hydroxide can cause cracks formation during dehydration, but C-S-H gel in cement paste is shrinking and the density of the matrix is increased. When free calcium oxide rehydrates, the cement matrix underwent bulk expansion and several microcracks can be formed. The metakaoline addition can reduce the probability of rising of cracks and raise the ultrasonic velocity. However, the effect of metakaoline quantity in concrete on the ultrasonic velocity in concrete after fire exposure is not evident. As a result, the effect of concrete addition quantity in concrete does not need any correction.



Rys. 5. Wpływ wilgotności betonu na szybkość ultradźwięków a) i względną szybkość ultradźwięków b) w próbkach betonu
 Fig. 5. Effect of concrete humidity on the ultrasonic velocity a) and the relative ultrasonic velocity b) in concrete samples

sta. Gdy tlenek wapniowy ulega rehydratacji, matryca cementowa ulega ekspansji, co prowadzi do powstania szeregu mikrospękań. Dodatek metakaolinitu zmniejsza prawdopodobieństwo powstawania spękań, co zwiększa szybkość ultradźwięków. Jednak wpływ ilości dodanego metakaolinitu na szybkość ultradźwięków w betonie poddanym działaniu podwyższonych temperatur nie uwidoczni się. W związku z tym, wpływ ilości dodanego do betonu metakaolinitu nie wymaga wprowadzenia współczynnika korekcyjnego.

3.2.4. Wpływ wilgotności betonu (W_p)

Zawartość wolnej wody w betonie wzrasta po poddaniu betonu działaniu wody i ulega zmianom z temperaturą. Zmiany wilgotności betonu będą wpływały na szybkość propagacji fal ultradźwiękowych w tym kompozycie. W celu zbadania tego czynnika próbki betonu po podgrzaniu do 600°C zanurzone w wodzie na różny okres i otrzymano różne wilgotności próbek. Zmierzono szybkość ultradźwięków w tych próbkach, a wyniki pokazano na rysunku 5. Krzywe te na rysunku 5 b) można opisać za pomocą równania:

$$V_T/V_0 = 102,7609 - 0,04919T, \quad R = -0,95486 \quad [6]$$

Szybkość ultradźwięków w betonie ogrzonym do wysokich temperatur wzrasta z zawartością wody. W betonie zawierającym więcej wody więcej porów zostaje nią wypełnionych. W związku z tym, że szybkość propagacji fal ultradźwiękowych w wodzie wynosi 1,45 km/s, natomiast w powietrzu ma wartość tylko 0,34 km/s, szybkość propagacji tych fal zwiększa się ze wzrostem zawartości wody w betonie. Współczynnik korekcyjny obejmujący wilgotność betonu został wyliczony z równania 4, a wyniki podano w tabelicy 2.

3.2.5. Wpływ włókien polipropylenowych

Dodatek włókien polipropylenowych (PP) w BWW może skutecznie ograniczyć powstawanie odprysków w tym betonie. Zastosowano dodatek włókien PP o różnych kształtach, długościach oraz w różnej ilości do betonu C70 i zbadano szybkość fal ultradźwiękowych po podgrzaniu do wysokiej temperatury. Wyniki pomiarów są podane w tabelicy 3. Nie ma wyraźnej zależności pomiędzy szybkością ultradźwięków, a kształtem, długością i ilością dodanych włókien PP.

Znaleziono zależność pomiędzy T a V_T/V_0 w betonie zawierającym różny dodatek włókien PP o różnych kształtach i długościach; można ją wyrazić za pomocą równania 7.

$$V_T/V_0 = 101,18619 - 0,07099T, \quad R = -0,94602 \quad [7]$$

Tablica 3 / Table 3

SZYBKOŚĆ ULTRADŹWIĘKÓW W BETONIE Z DODATKIEM RÓŻNYCH WŁÓKIEN PP PO PODGRZANIU DO WYSOKIEJ TEMPERATURY, km/s
THE ULTRASONIC VELOCITY OF CONCRETE WITH DIFFERENT PP FIBERS AFTER HEATING TO HIGH TEMPERATURES, km/s

Type of fiber	L = 15 mm, monofil type			L = 19 mm, monofil type			L=19 mm, reticulate type		
Mixture quantity, kg/m ³	0.6	1.0	1.4	0.6	1.0	1.4	0.6	1.0	1.4
25°C	5.29	5.29	5.23	5.35	5.25	5.20	5.25	5.23	5.24
400°C	3.49	4.07	3.40	3.58	4.15	4.21	3.26	3.82	3.77
600°C	3.70	3.76	2.94	3.21	3.68	2.65	2.94	2.62	2.72

3.2.4. Effect of water content of concrete (W_p)

The water content in concrete increases after water application to the building and varies with time. The change of concrete humidity will affect the propagation velocity of the ultrasonic wave in concrete. To examine this factor, the concrete samples after heating at 600°C were immersed in water for different times, and different water content were obtained. The ultrasonic velocity for these samples was measured and the results are shown in Fig. 5.

The curve is deduced by fitting the data in Fig. 5 b):

$$V_T/V_0 = 102,7609 - 0,04919T, \quad R = -0,95486 \quad [6]$$

The ultrasonic velocity of concrete heated at high temperatures increases with water content. In concrete with higher water content, more pores are filled by water. The propagation velocity of ultrasonic wave in water is 1.45 km/s, and that in air is only 0.34 km/s, so the velocity of ultrasonic waves propagation in concrete with higher water content ratio is higher.

The correction coefficient of water content is calculated from Eq. [4], and the results are given in Table 2.

3.2.5. Effect of polypropylen fibers

The addition of polypropylen (PP) fibers in HSC can effectively restrain spalling of HSC. The PP fibers with different shapes, lengths, and added quantities were applied to C70, and the ultrasonic velocity tested after heating up to high temperatures. The results of the tests are given in Table 3. There is no clear correlation between ultrasonic velocity and shape, length, or added quantity of PP fibers.

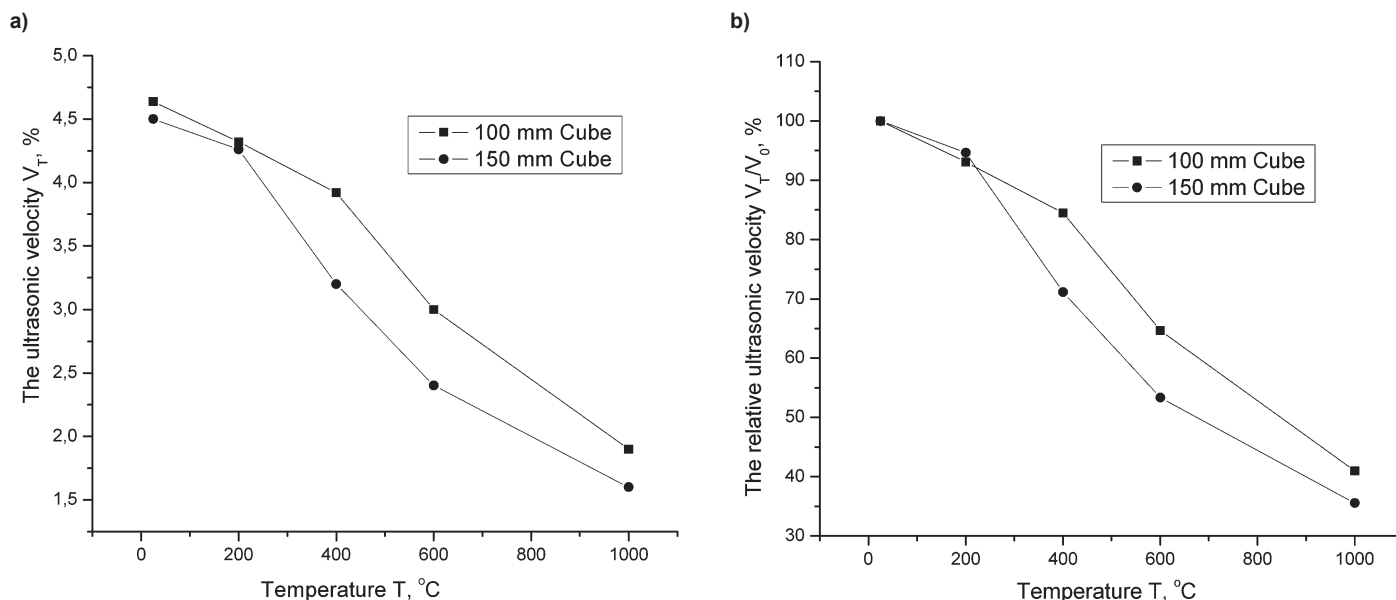
The relationship between T and V_T/V_0 of concrete with PP fibers addition of different shapes, lengths and quantities is fitted and the results are shown in Eq. [7]:

$$V_T/V_0 = 101,18619 - 0,07099T, \quad R = -0,94602 \quad [7]$$

The correction coefficients with and without PP fibers calculated from Eq. [4], are 0.997 and 1.001, respectively.

3.2.6. Effect of concrete specimen size

Variations of the tested specimen size affect the range of ultrasonic velocity. Fig. 6 shows the ultrasonic velocity and the relative ultrasonic velocity of concrete cubic specimens length of 100 mm and 150 mm after exposure to fire. From the results shown in Fig. 6 it



Rys. 6. Wpływ wielkości próbki na szybkość ultradźwięków a) i względną szybkość b) w betonie ogrzonym do różnych temperatur

Fig. 6 Effect of specimen size on the ultrasonic velocity a) and the relative ultrasonic velocity b) of concrete after heating to different temperatures

Współczynniki korekcyjne wyliczone z równania 4 bez i z dodatkiem włókien PP wynoszą odpowiednio 0,997 i 1,001.

3.2.6. Wpływ wymiarów próbek betonowych

Zmiany wymiarów badanych próbek wpływają na szybkość ultradźwięków. Na rysunku 6 pokazano szybkość ultradźwięków i względną szybkość ultradźwięków w kostkach betonowych o wymiarach: 100 mm i 150 mm, po ogrzaniu do wysokich temperatur. Krzywe zamieszczone na rysunku 6 pokazują, że szybkość propagacji fal ultradźwiękowych w kostce betonowej o wymiarach 150 mm jest mniejsza niż w kostce o wymiarach 100 mm. Jest to spowodowane tym, że zwiększony wymiar próbki pociąga za sobą stopniowy wzrost składnika o wysokiej częstotliwości w impulsie ultradźwiękowych. W związku z tym, że odległość propagacji jest większa, podstawowa częstotliwość otrzymanej fali jest stopniowo tłumiona. Odległość propagacji jest większa i podstawowa częstotliwość powstającej fali jest mniejsza. Z drugiej strony spadek częstotliwości powoduje większe cofnięcie pierwotnej fali i paralaksy podczas odczytu niż ma to faktycznie miejsce; natomiast może się pojawić tak zwane zjawisko rozproszenia, to znaczy że szybkość ultradźwięków spada z rosnącą częstotliwością.

Zależność wiążąca temperaturę i względną szybkość ultradźwięków w betonie w przypadku różnej wielkości próbek jest wyrażona za pomocą równania 8, które dobrze oddaje wyniki pokazane na rysunku 6 b):

$$V_T/V_0 = 103,52561 - 0,06683T, \quad R = -0,97633 \quad [8]$$

Współczynnik korelacji, ujmujący wielkość próbek, można wyliczyć z równania 4 i dla próbek o wymiarach 100 mm i 150 mm wynosi on odpowiednio: 1,050 i 0,954.

Omówione wyniki badań pokazują, że na szybkość ultradźwięków ma wpływ wiele czynników i czynniki te wpływają głównie na zależności R_T/R_0 i V_T/V_0 . W celu maksymalnego zmniejszenia

can be seen that the propagation velocity of ultrasonic waves in concrete cube specimen side of 150 mm length is lower than that in concrete cube specimens of 100 mm. This is due to the fact that the increased size of specimen causes a high frequency component in ultrasonic pulse to attenuate gradually. The propagation distance is greater and the basic frequency of receiving wave is lower. On one hand, the decrease in frequency makes the former wave and the parallax during reading appear to be further back than it actually is; on the other hand, the so-called dispersion phenomenon may appear, i. e. the ultrasonic velocity drops with decreasing frequency.

The correlation between temperature and the relative ultrasonic velocity of concrete with different specimen sizes is obtained by fitting data in Fig.6 b):

$$V_T/V_0 = 103,52561 - 0,06683T, \quad R = -0,97633 \quad [8]$$

The correction coefficient of specimen size is calculated by Eq. [4], and the values for concrete samples dimension of 100 mm and 150 mm are 1.050 and 0.954, respectively.

The above-mentioned testing results show that the ultrasonic velocity is influenced by many factors, and these factors chiefly influence the relationship between R_T/R_0 and V_T/V_0 . To reduce the error brought by these factors as much as possible, the relationship between the relative compressive strength and the relative ultrasonic velocity established in this paper is amended by Eq. [9]:

$$(V_T/V_0)_s = (V_T/V_0) \cdot \eta \quad [9]$$

where $\eta = \eta_s \cdot \eta_g \cdot \eta_w \cdot \eta_p \cdot \eta_d$

4. Conclusions

The propagation velocity of ultrasonic waves in concrete exposed to high temperatures is dependent of its residual compressive

błędów spowodowanych przez te czynniki, zależności pomiędzy względną wytrzymałością na ściskanie i względną szybkością ultradźwięków otrzymane w tej pracy można wyrazić równaniem 9:

$$(V_T/V_0)_s = (V_T/V_0) \cdot \eta \quad [9]$$

gdzie $\eta = \eta_s \cdot \eta_g \cdot \eta_w \cdot \eta_p \cdot \eta_d$

4. Wnioski

Szybkość propagacji fal ultradźwiękowych w betonie narażonym na działanie wysokich temperatur zależy od jego resztkowej wytrzymałości na ściskanie, rodzaju mikrostruktury i stopnia uszkodzenia. Jednak krzywa zbadanej wytrzymałości oznaczona metodą podaną w CECS 02:2005 nie może być stosowana do oszacowania wytrzymałości na ściskanie betonu, narażonego na działanie ognia. W oparciu o liczne doświadczenia ustalono zależności pomiędzy resztkową wytrzymałością na ściskanie a szybkością propagacji fal ultradźwiękowych oraz względną resztkową wytrzymałością na ściskanie i względną szybkością propagacji fal ultradźwiękowych. Po przedyskutowaniu wpływu klasy betonu, rodzaju kruszywa, dodatków, zawartości wody, rodzaju włókien i wymiaru próbek betonowych na szybkość ultradźwięków w betonie poddanym działaniu ognia, przedstawiono metodę korekcji oznaczonej wytrzymałości za pomocą szybkości fal ultradźwiękowych. Podstawowe wyniki badań są następujące:

- (1) Zależność pomiędzy względną szybkością ultradźwięków i względną wytrzymałością na ściskanie betonu poddanego działaniu wysokich temperatur jest następująca:

$$R_T/R_0 = 1,09906 \cdot (V_T/V_0)^{0,98323}. \text{ Szybkość fal ultradźwiękowych i wytrzymałość na ściskanie betonu poddanego działaniu wysokich temperatur } R_T \text{ można wyrazić następująco: } R_T = 11,27781 V_T^{1,22033}.$$

- (2) Szybkość ultradźwięków w BWW jest większa niż w normalnym betonie po poddaniu ich działaniu tej samej temperatury. Spadek szybkości ultradźwięków w betonie z kruszywem bazaltowym jest większa niż w betonie z kruszywem z wapienia po poddaniu go działaniu wysokich temperatur. Dodatek metakaolinitu zmniejsza prawdopodobieństwo powstawania rys i zwiększa szybkość ultradźwięku, jednak wpływ dodatków do betonu i ich ilości na szybkość ultradźwięków nie jest wyraźna. Szybkość ultradźwięków w betonie podgrzanym do wysokich temperatur rośnie ze zwiększeniem wilgotności betonu. Dodatek włókien PP zapobiega powstawaniu odprysków w przypadku BWW, lecz równocześnie zastosowanie tych włókien nie jest głównym czynnikiem wpływającym na szybkość ultradźwięków w betonie. Szybkość ultradźwięków maleje ze wzrostem wymiarów próbek betonowych.
- (3) Do praktycznego uwzględnienia tych czynników należy wziąć pod uwagę: klasę betonu, rodzaj kruszywa, wilgotność betonu, dodane włókna i wielkość próbek. Współczynniki korekcyjne dla betonu klas C30, C50, C70 i C90 wynoszą odpowiednio 0,895; 0,988; 1,020 i 1,093. Współczynnik korekcyj-

strength, microstructure character, and degree of damage. However, the testing strength curve given in technical specification CECS 02:2005 is not suitable for estimating the compressive strength once concrete has been exposed to fire. On the basis of a large number of tests, the relationships between residual compressive strength and ultrasonic wave propagation velocity, and the relative residual compressive strength and the relative ultrasonic wave propagation velocity are established. After discussing the effects of concrete class, aggregate type, concrete additive, water content, fiber, and specimen size on ultrasonic velocity of fire-exposed concrete, the correction method for concrete strength with testing with ultrasonic velocity has been presented. The main research results are as follows:

- (1) The relationship between the relative ultrasonic velocity and the relative compressive strength of concrete exposed to high temperatures is: $R_T/R_0 = 1,09906 \cdot (V_T/V_0)^{0,98323}$. For ultrasonic velocity and compressive strength of concrete exposed to high temperatures, $R_T = 11,27781 V_T^{1,22033}$.
- (2) The ultrasonic velocity of HSC is higher than that of NSC after exposure to the same temperature. The decrease of the ultrasonic velocity of concrete with basalt aggregate is higher than that of concrete with limestone aggregate after exposing to high temperatures. The addition of metakaoline reduces the probability of cracks formation and increases the ultrasonic velocity. However, the effect of concrete additives and their quantity on the ultrasonic velocity is not evident. The ultrasonic velocity of concrete exposed to high temperatures is increased with higher humidity of concrete. Addition of PP fibers prevents spalling of HSC, but the application of these fibres is not a major factor affecting the ultrasonic velocity in concrete. The ultrasonic velocity decreases with increasing a concrete specimen size.
- (3) For practical applications the following factors should be considered: concrete class, aggregate type, its humidity, fibers added, and specimen size. The correction coefficients for concrete class C30, C50, C70, and C90 are 0.895, 0.988, 1.020, and 1.093, respectively. The correction coefficient of aggregate type for basalt and limestone is 0.938 and 1.059, respectively. When the humidity concrete specimens is 1 ~ 1.5; 1.5 ~ 2 and 2 ~ 2.5, the corresponding correction coefficients are 0.977, 1.009, and 1.013, respectively. The correction coefficients of concrete with and without PP fibers are 0.997 and 1.001, respectively. The correction coefficients for cubic specimens with sizes of 100 mm and 150 mm are 1.050 and 0.954, respectively.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support for this research by National Natural Science Foundation of China (50808042) for youths, Six Projects Sponsoring Talent Summits of Jiangsu Province (1112000053), the Project-sponsored by SRF for ROCS, SEM., Research Program for Excellent Young

ny uzględniający rodzaj kruszywa bazaltowego i wapienne-
go wynosi odpowiednio: 0,938 i 1,059. Kiedy wilgotność pró-
bek betonowych wynosi 1 ~ 1,5; 1 ~ 2 i 2 ~ 2,5, odpowied-
nie współczynniki korekcyjne wynoszą: 0,977; 1,009 i 1,013.
Współczynniki korekcyjne dla betonu bez i z dodatkiem włó-
kien polipropylenowych wynoszą odpowiednio: 0,997 i 1,001.
Współczynniki korekcyjne w przypadku kostek o wymiarach
100 mm i 150 mm wynoszą odpowiednio: 1,050 i 0,954.

Teachers of Southeast University(4012001017), Key laboratory
for concrete and prestressed concrete of ministry of education,
Southeast University.

Literatura / References

1. Sandor Popovics, Effects of uneven moisture distribution on the strength of and wave velocity in concrete, 43 (6), 429-434, Ultrason (2005).
2. Saad A. Abo-Qudais, Effect of concrete mixing parameters on propa-
gation of ultrasonic waves, 19 (4), 257-263, Constr Build Mater (2005).
3. Li Weidu, Concrete non-destruction measurement technology, Shanghai,
Tongji University Press, 1989 [in Chinese].
4. Jean-François Chaix, Vincent Garnier, Gilles Corneloup, Concrete
damage evolution analysis by backscattered ultrasonic waves, 36 (7),
461-469, NDT Int. (2003).
5. V. K. R. Kodur, M. A. Sultan, Effect of Temperature on Thermal Properties
of High-Strength Concrete, 15 (2), 1153-1156, J. Mater. Civ. Eng. (2003).
6. Omer Arioz, Effects of elevated temperatures on properties of concrete,
42 (8), 516-522, Fire Safe J (2007).
7. Faris Ali, Ali Nadjai, Gordon Silcock, Abid Abu-Tair, Outcomes of a major
research on fire resistance of concrete columns, 39 (6), 433-445, Fire
Safe J (2004).
8. Roberto Felicetti, The drilling resistance test for the assessment of
fire damaged concrete, 28 (4), 321-329, Cem Concre Compos (2006).
9. K. Savov, R. Lackner, H. A. Mang, Stability assessment of shallow tun-
nels subjected to fire load, 40 (8), 745-763, Fire Safe J (2005).
10. B. Georgali, P. E. Tsakiridis, Microstructure of fire-damaged concrete,
A case study, 27 (2), 255-259, Cem. Concr. Compos. (2005).
11. Lv Tianqi, Zhao Guofan, Lin Zhishen. The experimental research on ap-
plying rebound and ultrasonic to assess compressive strength of concrete
subjected to fire and considered standing time effect after fire, 8, 21-25,
Concrete 2002 [in Chinese].
12. Matteo Colombo, Roberto Felicetti, New NDT techniques for the assess-
ment of fire-damaged concrete structures, 42 (7), 461-472, Fire Safe J (2007).
13. Zhang Keqiang, Yang Bo, Chen Lihong, Nondestructive testing of C20
concrete strength after high temperature, 24 (8), 339-340, NDT 2002 [in
Chinese].
14. Li Min, The fire damage of high strength concrete and its comprehensive
evaluation, PhD thesis, Nanjing, Southeast University 2005 [in Chinese].
15. J. R. Lieslide, W. J. Cheesman, ACIJ. Proc. 46 (1), 17 (1949).
16. R. Jones, E. N. Gatfield, DSIR Road Res. Tech. paper no 34 (London
H. N. S. O.), 1955.