

dr inż. Izabela Hager, dr inż. Tomasz Tracz, inż. Katarzyna Krzemień

Politechnika Krakowska, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli

Przydatność wybranych metod nieniszczących i niszczących w ocenie stanu betonu po pożarze*

The usefulness of selected non-destructive and destructive methods in the assessment of concrete after fire*

1. Wprowadzenie

Przeprowadzone badania dotyczyły określenia uszkodzeń betonu spowodowanych działaniem pożaru. Działanie wysokiej temperatury powoduje stopniową dehydratację zaczynu cementowego i jego zarysowanie, co przyczynia się do pogorszenia właściwości mechanicznych (1). Zasięg uszkodzeń oraz miąższość warstwy uszkodzonej można określać metodami stosowanymi *in-situ* lub laboratoryjnymi (2, 3). W artykule przeprowadzono ocenę przydatności wybranych metod diagnostycznych, głównie nieniszczących, lecz także niektórych niszczących, stosowanych do oceny stanu betonu poddanego działaniu temperatury spotykanej w trakcie pożaru. Celem badań było również ustalenie zależności między wybranymi parametrami diagnostycznymi i resztkowymi cechami mechanicznymi, uszkodzonego betonu.

2. Materiały i metody badań

Badaniami objęto beton zwykły, którego skład podano w tablicy 1. Beton miał stosunek w/c równy 0,6 i zawierał kruszywo rzeczne Dwudniaki oraz cement CEM I 42,5 R. Przeprowadzone badania miały na celu zbadanie zmian wybranych właściwości (gęstość,

1. Introduction

The research concerned determination of concrete damage caused by the action of fire. High temperature results in gradual dehydration of cement paste and its cracking, which contributes to deterioration of mechanical properties of concrete (1). The extent of damage as well as the thickness of the damaged layer was assessed with the use of *in situ* and laboratory methods (2, 3). This paper presents an assessment of the suitability of certain selected diagnostic methods, mainly non-destructive but also some destructive, used to ascertain the properties of concrete subjected to the temperature characteristic of fire. The aim of this study was also to establish the relationship between certain selected diagnostic parameters and residual values of mechanical properties of concrete.

2. Materials and test methods

The tests were carried out on ordinary concrete, the composition of which is presented in Table 1. The concrete with water cement ratio w/c = 0.6, contained the Dwudniaki river gravel and cement CEM I 42.5 R. The research aimed at determining the changes of

*Referat opracowany na XIX Konferencję Naukowo-Techniczną „Kontra”

*The paper to be presented at the XIX “Kontra” Conference

wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz moduł sprężystości), a także parametrów ogólnie stosowanych w nieniszczących metodach diagnostycznych (twardość powierzchniowa, prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej). Właściwości określano po 90 dniach dojrzewania betonu w warunkach normalnych oraz tak przygotowanych próbek po ich ogrzewaniu do temperatury 200, 400, 600, 800, 1000°C i po ochłodzeniu do temperatury pokojowej. Zbadane resztkowe właściwości betonu, pozwoliły na określenie przebiegu ich zmian w funkcji temperatury. W badaniach tych stosowano próbki sześciennie o boku 15 cm i walce Ø100 mm, h = 200 mm.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD BETONU W kg/m³

COMPOSITION OF CONCRETE IN kg/m³

Składnik/Component	Zawartość/ Content
Cement CEM I 42,5R	325
Woda/Water	195
Piasek/Sand 0-2 mm	825
Żwir/Gravel 2-8 mm	447
Żwir /Gravel 8-16 mm	409
w/c	0,6

Badaniami objęto również płytę betonową o wymiarach 1200x1000x300 mm, którą ogrzewano jednostronnie w pokazanym na rysunku 1 piecu DRAGON, wyposażonym w palnik gazowy o mocy 140 kW. Komora umożliwia ogrzewanie płyt betonowych z przyrostem temperatury odpowiadającym warunkom jakie występują podczas pożaru. W trakcie ogrzewania temperaturę we wnętrzu płyty mierzono za pomocą termopar, umieszczonych w trakcie formowania, w centralnej części płyty na głębokościach rosnących o 3 cm od 1 cm do 22 cm. Temperaturę zapisywał rejestrator LUMEL KD7, z częstotliwością jeden pomiar na minutę. Równocześnie mierzono temperaturę w piecu, tuż przy powierzchni płyty stosując termoelement powierzchniowy (powierzchnia 100 cm²), zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 1363-1:2012. Płyta została poddana działaniu termicznemu o przebiegu zbliżonym do nominalnej krzywej temperatura-czas, według zaleceń ISO 834. Przedstawiona w tym dokumencie zależność T(t) określa wzrost temperatury spalin T w otoczeniu badanego elementu w °C, w funkcji czasu t w minutach:

$$T = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad [1]$$

W badaniach przyjęto dwugodzinny czas ogrzewania płyty. Wzrost temperatury w piecu w trakcie ogrzewania przedstawiono na rysunku 2.

Przed wygrzewaniem płyty określono twardość powierzchniową betonu metodą młotka Schmidta oraz prędkość powierzchniowej fali ultradźwiękowej. Po ogrzaniu i ochłodzeniu wykonano badania mające na celu wykonanie mapy zasięgu uszkodzeń oraz pobrano odwierty rdzeniowe (Ø 65 mm), określając miąższość warstwy uszkodzonej działającą temperaturą metodą ultradźwiękową (układ głowic skośny). Po zakończeniu badań nieniszczących odwierty

some selected properties (density, compressive strength, splitting tensile strength and modulus of elasticity) as well as of selected parameters determined with the use of commonly applied non-destructive diagnostic methods (surface hardness and ultrasound pulse velocity). The properties were tested after 90 days of maturing in standard conditions on non-heated samples as well as after heating them to temperature 200, 400, 600, 800 and 1000°C and cooled down to room temperature. In this way, the residual values of the studied characteristics of concrete were defined, which allowed to determine the change of tested properties with temperature. Cubic specimens 15x15x15cm³ and cylindrical specimens Ø100 mm, h = 200 mm were employed.

The concrete slab of dimensions 1200x1000x300 mm³ was also examined after heating from one side in the DRAGON furnace, presented in Fig. 1, equipped with a 140 kW gas burner. The furnace allows heating of concrete slabs with an intensity corresponding to the conditions that occur during a fire. During heating the temperature in the slab cross-section was measured with type K thermocouples, placed in the central part of the slab during casting at the depths increasing of 3 cm from 1 cm to 22 cm. The temperature was recorded using a LUMEL KD7 recorder with the frequency of one measurement per minute. In addition, during the test the temperature in the furnace was measured, close to the surface of the slab, using a plate thermocouple (surface area 100 cm²), in compliance with the PN-EN 1363-1:2012 standard. The slab was subjected to the thermal load similar to the nominal temperature-time curve recommended by ISO 834. Presented in this document relationship T (t) determines the development of the exhaust gas temperature T, in the vicinity of the tested element in °C as a function of time t in minutes:

$$T = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad [1]$$

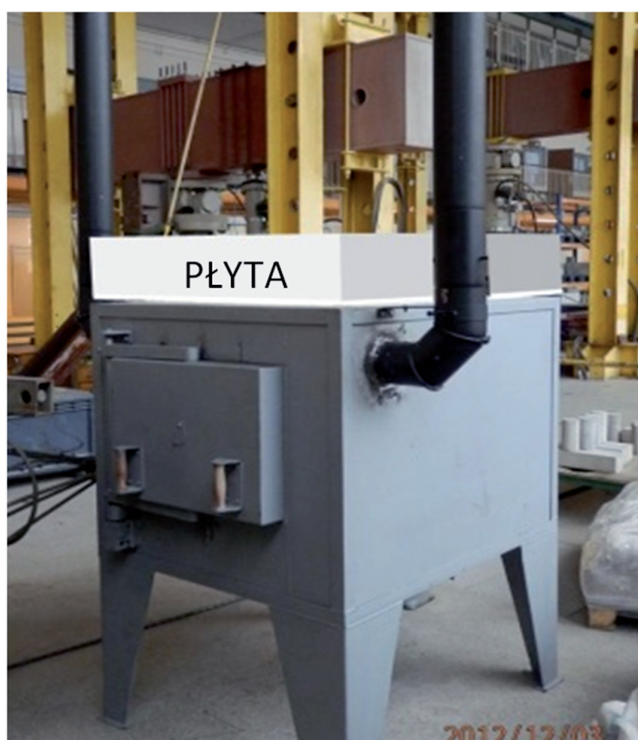
In this study the two hours slab heating was adopted. The temperature evolution during heating is shown in Fig. 2.

Before heating the slab the surface hardness of the concrete using Schmidt rebound hammer as well as ultrasonic pulse velocity were determined. After heating and cooling, the tests were performed in order to collect data for drawing a map of the damage range and also the cores were drilled (Ø 65 mm) and examined with the use of the ultrasonic method (direct transmission), so that the thickness of the layer damaged by temperature was assessed. After completion of the non-destructive testing, the cores were cut into cylinders of the height equal to their diameter and used subsequently as samples for destructive tests.

3. Results

3.1. Tests on heated cubic specimens

The plots of curves in Figure 3 show the changes of mechanical properties and the selected diagnostic parameters determined on the specimens of the material heated at the constant rate of



Rys. 1. Płyta i piec DRAGON

Fig. 1. Slab and the DRAGON furnace

pocięto na walce o wysokości równej ich średnicy, na których przeprowadzono badania niszczące.

3. Wyniki badań

3.1. Badania wygrzewanych próbek kostkowych

Krzywe na rysunku 3 przedstawiają zmiany właściwości mechanicznych oraz wybranych parametrów cech diagnostycznych określonych na próbkach ogrzewanych ze stałą prędkością 0,5°C/min do temperatury 200, 400, 600, 800 i 1000°C i wygrzewanych w tej temperaturze przez 3 godziny.

Krzywe obrazują względne zmiany badanej cechy w funkcji temperatury. Krzywe przedstawiają wartości średnie, uzyskane dla trzech próbek niewygrzewanych (tablica 1) i dla dwóch wygrzewanych, do kolejnych temperatur.

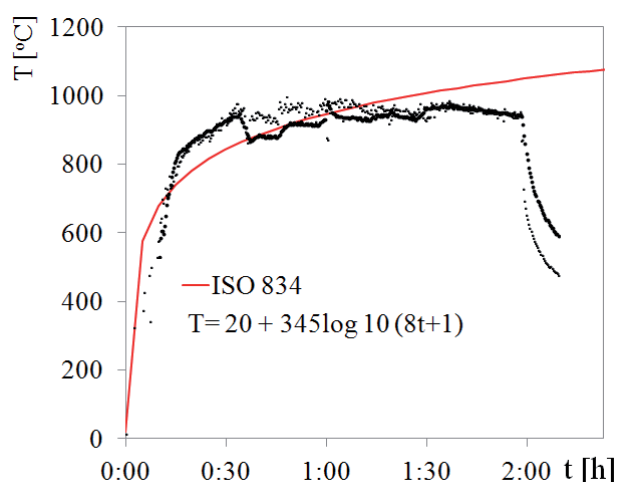
Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, iż zmiany prędkości rozchodzenia się ultradźwięków (V_T) bardzo dobrze korelują ze zmianami wytrzymałości materiału (f_c i f_t) [rysunek 4]. Na rysunku 3 pokazano również wpływ temperatury na określaną młotkiem Schmidta twardość powierzchniową próbek $L_T(T)$. Zmiany tej cechy w funkcji temperatury nie korelują już tak dobrze ze zmianami wytrzymałości jak zmiany prędkości ultradźwięków $V_T(T)$.

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI BETONU NIEOGRZEWANEGO

PROPERTIES OF UNHEATED CONCRETE

ρ [kg/m ³]	f_{cm} [MPa]	f_{tm} [MPa]	E [GPa]	V [km/s]	L [-]
2177	51,5	4,0	19,6	3,45	45



Rys. 2. Wzrost temperatury w piecu oraz przebieg krzywej ISO 834

Fig. 2. Temperature increase in the furnace and ISO 834 curve

0.5°C/min to the temperature 200, 400, 600, 800 and 1000°C and maintained for 3 hours at this temperature.

The curves show the relative change of a given property as the function of temperature. The curves illustrate the mean values from three unheated specimens (Table 1) and from two heated to the aforementioned temperatures.

The obtained relationships show that the quantitative changes of ultrasonic pulse velocity (V_T) correspond in the greatest extent to the changes of material strength (f_c and f_t). The Fig. 3 shows the effect of temperature on surface hardness $L_T(T)$ determined with the Schmidt rebound hammer. Changes of this characteristic as a function of temperature are not as consistent quantitatively with the changes of strength as ultrasound pulse velocity $V_T(T)$.

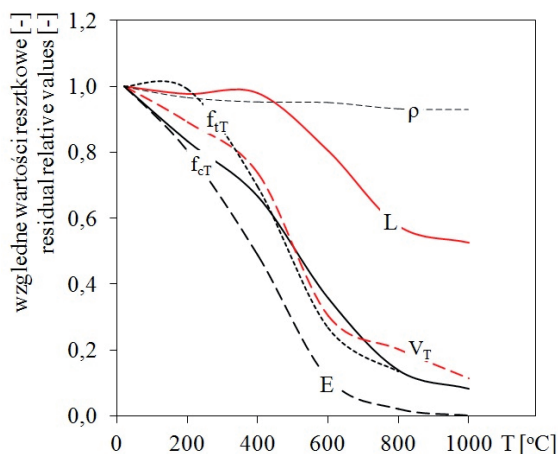
Using the results of ultrasonic pulse velocity measurements of concrete specimens and the compressive strength tested on cubic samples, relationship $f_{cT} - V_T$ was determined. The ultrasonic pulse velocity of unheated concrete was of 3.45 km/s. Similarity as in the case of strength, heating resulted in a gradual reduction of velocity V_T . Ultrasonic pulse velocity in concrete heated to 800°C was equal to 0.40 km/s. The relationship between the residual strength of concrete and the pulse velocity is shown in Fig. 4. The results obtained were approximated with a logarithmic function of a similar nature as in the previous study of one of the authors (4). The function shows the established correlation with the coefficient of determination R^2 , characterizing the degree of their adjustment to the results:

$$f_{cT} = 21.69 \ln(V_T) + 19.47 \quad (R^2 = 0.94) \quad [2]$$

The presented relationship was used for material damage determination of a concrete slab heated according to the ISO 834.

3.2. Slab testing with in-situ methods

As visual inspection have shown the heated slab surface was cracked [Fig. 5a]. A network of those cracks formed an areas of



Rys. 3. Względne właściwości resztkowe próbek

Fig. 3. Relative residual properties of concrete samples

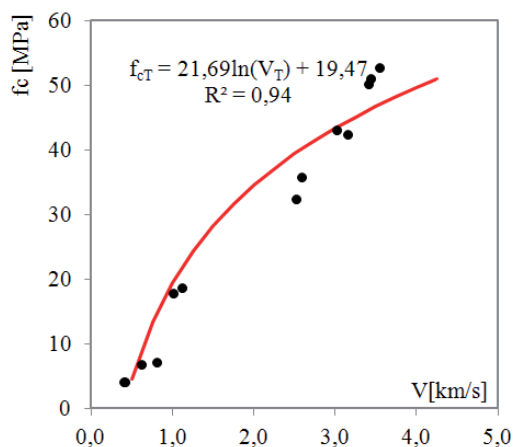
Wykorzystując wyniki pomiarów prędkości rozchodzenia się fali dźwiękowej w betonie oraz wytrzymałość na ściskanie zmierzoną na próbkach kostkowych, wyznaczono zależność f_{cT} - V_T . Prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w próbkach betonu niewygrzewanego wynosiła 3,45 km/s. Podobnie jak w przypadku wytrzymałości, wygrzewanie spowodowało stopniowe zmniejszenie prędkości fali ultradźwiękowej V_T . Prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie ogrzwanym do 800°C wynosiła 0,40 km/s. Zależność pomiędzy prędkością fali ultradźwiękowej a resztkową wytrzymałością próbek betonowych przedstawiono na rysunku 4. Wyniki uzyskanych badań aproksymowano funkcją logarytmiczną, analogicznie jak w poprzedniej pracy jednego z autorów (4). Na wykresie przedstawiono ustaloną zależność korelacyjną wraz ze współczynnikiem determinacji R^2 , charakteryzującymi stopień ich dopasowania do wyników:

$$f_{cT} = 21.69 \ln(V_T) + 19.47 \quad (R^2 = 0.94) \quad [2]$$

Ta zależność została wykorzystana do określenia uszkodzeń materiałowych wygrzewanej płyty betonowej, według zaleceń ISO 834.

3.2. Badania płyty prowadzone metodami in-situ

Jak wykazały obserwacje wzrokowe na powierzchni wygrzewanej płyty wystąpiły spękania [rysunek 5a]. Ta sieć spękań utworzyła wyraźne pola o zbliżonej wielkości [rysunek 5b]. Rozwartość powstałych rys wynosiła od 0,5 do 2 mm. Ogrzewanie nie spowodowało odprysków, które mogłyby świadczyć o wystąpieniu zjawiska eksplozyjnego złuszczenia. Po ochłodzeniu przeprowadzono badania młotkiem Schmidta, których celem było określenie zasięgu uszkodzeń termicznych. Liczbę odbicia mierzono w punktach odległych od siebie o 20 mm, tworząc mapę uszkodzeń [rysunek 5c]. Pasmowe obrzeża płyty, spoczywające na ścianach pieca, nie były wystawione na promieniowanie jego elementu grzewczego i te powierzchnie dawały liczbę odbicia wynoszącą średnio 48. W strefie intensywnie ogrzewanej o wymiarach 750 x 950 mm liczba odbicia była znacznie niższa i wynosiła średnio 35, co oznaczało jej spadek o około 30%, w stosunku do płyty nieogrzewanej ($L=49$). Krzywą zmian liczby odbicia przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 4. Zależność pomiędzy resztkową wytrzymałością (f_{cT}) a prędkością fali ultradźwiękowej (V_T)

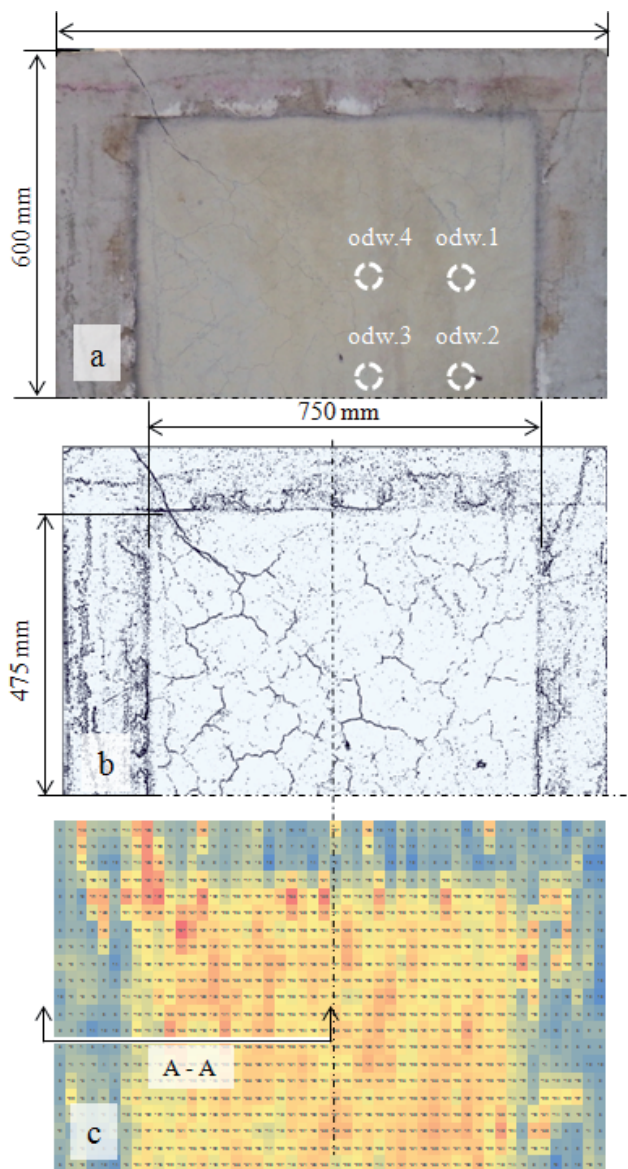
Fig. 4. Residual compressive strength (f_{cT}) and ultrasound pulse velocity (V_T) relationship

similar size [Fig. 5b]. The cracks apertures ranged from 0.5 to 2 mm. Heating did not cause any damage indicating the occurrence of the phenomenon of explosive spalling. After cooling, an examination with the Schmidt rebound hammer was performed for the extent of thermal damage determination. The rebound number was measured in the points with 20 mm spacing, thus forming a map of defects [Fig. 5c]. The bands of the slab resting on the walls of the furnace were not exposed to the radiation of the heating elements and in this part the surface hardness was 48 on average. In the intensely heated zone, measuring 750 x 950 mm, the rebound number was much lower and reached 35 on average, which indicates the decrease of about 30% in relation to the unheated slab ($L = 49$). The profile of the number of reflections is shown in Fig. 6.

The concrete slab tested before heating, using the ultrasonic pulse velocity method with the transducers placed on the surface, shows the linear relationship between the wave transit time and the distance between the transducers. The ultrasonic pulse velocity determined in this way on undamaged materials was equal to $V_{surf} = 2.42$ km/s, tested in direct transmission was higher, $V_{direct} = 3.45$ km/s. The ratio of velocities V_{surf}/V_{direct} was equal to 0.7, which was similar to the results of other researches (5). The surface transmission tests of the slab after heating were carried out applying the constant distance of 10 cm between transducers. The results of the ultrasonic pulse velocity tests are shown in Fig. 6. The measurements at a distance greater than 20 cm from the edge were precluded due to the occurrence of a cracks network, which depth, as demonstrated by visual inspection of the core drillings, reached even 240 mm. The profile of V-values is presented in Fig. 6.

3.3. Laboratory testing of the concrete slab core drillings

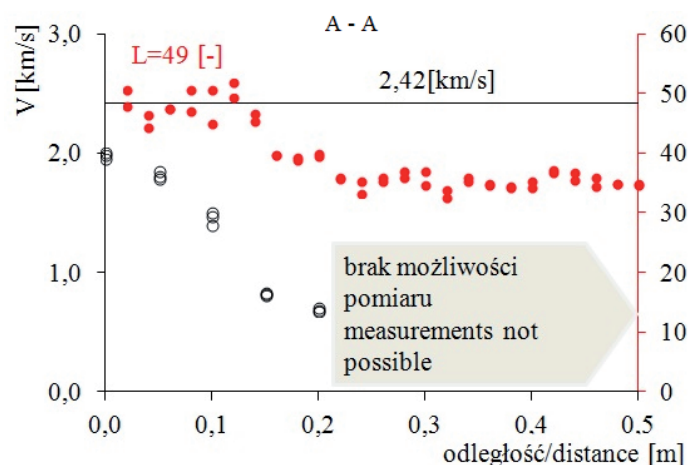
Four core drillings were collected from the concrete slab, with the diameter of $\varnothing 65$ mm [Fig. 7] and the length equal to the thickness of the slab at the point where the sample was taken [Fig.



Rys. 5. Połowa płyty po wygrzewaniu, zarysowanie powierzchni i mapa uszkodzeń wyznaczona metodą młotka Schmidta

Fig. 5. Half of the slab after heating, surface crazing and the damage map determined by the Schmidt rebound hammer

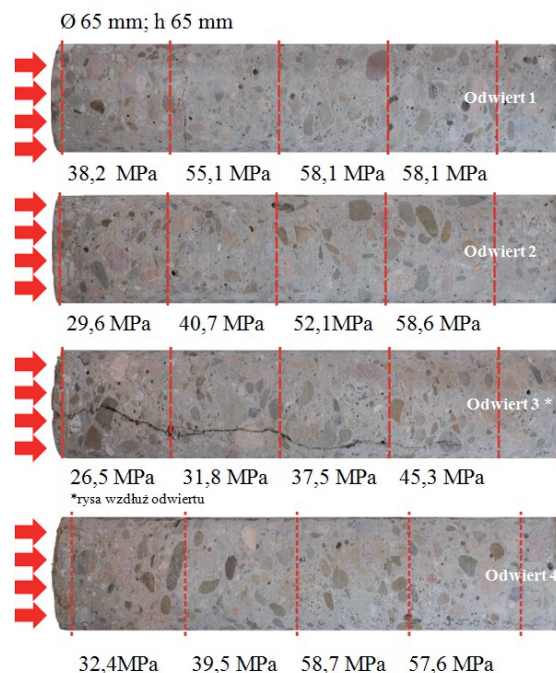
Badania płyty przed ogrzaniem metodą ultradźwiękową w powierzchniowym układzie głowic wykazały liniową zależność czasu przejścia fali od odległości pomiędzy głowicami. Określona tą metodą prędkość rozchodzenia się dźwięku w materiale nieuszkodzonym, wyniosła $V_{pow} = 2,42$ km/s, a w skośnym układzie głowic, była wyższa i wynosiła $V_{skr} = 3,45$ km/s. Stosunek prędkości V_{pow} / V_{skr} wyniósł 0,7 co stanowi wartość zbliżoną do wyników innych prac (5). Badania powierzchniowe płyty po jej ogrzewaniu przeprowadzono zachowując stałą odległość między głowicami, wynoszącą 10 cm. Wyniki pomiarów ultradźwiękowych pokazano także na rysunku 6. Pomiarzy w odległości większej niż 20 cm od krawędzi uniemożliwiała obecność sieci rys, których głębokość, jak pokazały oględziny odwiertów rdzeniowych, wynosiła nawet 240 mm. Profil wartości V przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wyniki badań płyty metodami *in-situ* dla profilu A-A.

Fig. 6. Results of *in-situ* test for slab in A-A profile

5a]. Measurements of the ultrasonic pulse velocity were carried out on the cores with the use of the Pundit Lab Plus device with exponential probes generating a sound wave of the frequency of 54 kHz. The testing points were placed along the cylinder peripheral, at the spacing of 1 cm. The results of measurements are shown in Fig. 8b. It was possible to find the presence of the deteriorated material layer, for which the ultrasonic pulse velocity was below 3 km/s. The determined thickness of this layer was 100 mm. Using the previously established relationship between the strength and the ultrasonic pulse velocity in the tested concrete: $f_{ct} = 21.69 \ln(V_T) + 19.47$, local compressive strength values for the successive layers were calculated [Fig. 8c]. After completion of the non-destructive testing, the cores were cut into smaller cylinders with the length equal to their diameters. These samples were used for determining the compressive strength with the use of



Rys. 7. Odwierty oraz wytrzymałość f_c ich poszczególnych części

Fig. 7. Appearance of cored samples and f_c results of individual parts

3.3. Laboratoryjne badania odwiertów z płyty

W płycie wykonano 4 odwierty o średnicy \varnothing 65 mm [rysunek 7] i długości odpowiadającej grubości płyty, w miejscu ich pobrania [rysunek 5a]. Na odwiertach przeprowadzono pomiary prędkości rozchodzenia się dźwięku betonoskopem Pundit Lab Plus, wykorzystując głowice eksponencjalne, generujące falę dźwiękową o częstotliwości 54 kHz. Pomiary wykonano wzdłuż pobocznic walca, co 1 cm. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rysunku 8b. Stwierdzono występowanie warstwy materiału, w której prędkość fali dźwiękowej była mniejsza od 3 km/s. Grubość tej warstwy wynosiła około 100 mm. Wykorzystując wcześniej określoną zależność pomiędzy prędkością rozchodzenia się dźwięku i wytrzymałością betonu: $f_{ct} = 21,69 \ln(V_T) + 19,47$, wyznaczono lokalną wytrzymałość na ściskanie kolejnych warstw betonu [rysunek 8c]. Po zakończeniu badań nieniszczących odwierty pocięto na walce o wysokości równej ich średnicy, mierząc wytrzymałość na ściskanie tak otrzymanych próbek. Wytrzymałość poszczególnych próbek pokazano na rysunku 7. Wyniki uzyskane w przypadku odwiertu trzeciego, ze względu na obecność rysy wzdłuż wysokości walca, pominięto w dalszych analizach. Po uwzględnieniu efektu skali, zgodnie z normą PN-EN 12504-1, wytrzymałość uzyskaną na walcach przeliczono na wytrzymałość na kostkach i porównano z wynikami uzyskanymi metodą ultradźwiękową [rysunek 8 c].

4. Wnioski i spostrzeżenia

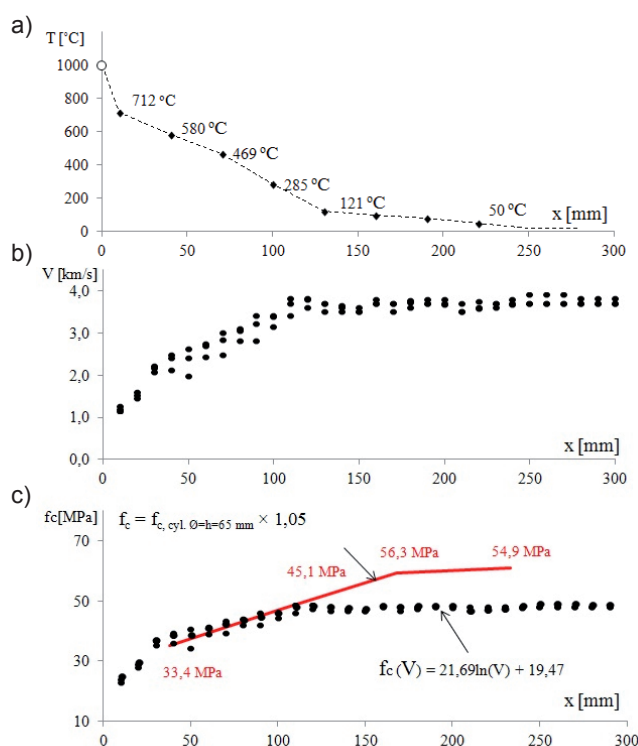
Na podstawie wyników przeprowadzonych badań sformułować można następujące wnioski i spostrzeżenia. Należy podkreślić, iż odnoszą się one tylko do pewnej grupy betonów, dla których poddany badaniom beton może być reprezentatywny.

Wyniki badań prowadzonych na próbkach kostkowych można podsumować następująco:

- przebieg zmian właściwości badanych metodami nieniszczącymi (L i V) jest pod względem jakościowym [rysunek 3] podobny do zmian właściwości mechanicznych (f_c , f_t , E),
- pod względem ilościowym [rysunek 3], występuje duża zgodność prędkości rozchodzenia się ultradźwięków przy skrośnym ich przepływie z wytrzymałością próbek na ściskanie.

Wyniki badań prowadzonych na elementach płytowych pozwalają na postawienie następujących wniosków:

- metoda ultradźwiękowa przy powierzchniowym rozchodzeniu się fali okazała się mało przydatna, gdyż stopień uszkodzeń w postaci siatki zarysowań uniemożliwia miarodajny pomiar tej prędkości,
- natomiast pomiar prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowa dał dobre wyniki przy skrośnym jej przepływie, zmierzonym na odwiertach rdzeniowych; metoda ta pozwala na ocenę stopnia uszkodzeń betonu wzdłuż długości odwiertu, pobranego z elementu poddanego działaniu wysokiej temperatury. Stwierdzono także dobrą korelację prędkości ultradźwięków z wytrzymałością na ściskanie [rysunek 8c].



Rys. 8. Temperatura wygrzewania próbek (a) oraz zmiany prędkości ultradźwięków (b) i porównanie zmierzonej f_c z obliczoną $f_c(V)$ (c) x - odległość próbek od ognia

Fig. 8. Temperature of sample heating (a), change of ultrasound pulse velocity (b) and comparison of measured f_c and calculated $f_c(V)$ (c) x - distance of samples from fire

a destructive method. The strength of these samples is presented in Fig. 7. The results obtained from the third core were omitted in the further analyses, due to the presence of cracks along the height of the cylinder. After taking into account the scale effect, in compliance with PN-EN 12504-1, the strength obtained on the cores were converted to the strength of cubes and compared with the results taken from the ultrasonic method [Fig. 8c].

4. Conclusions and observations

On the basis of the experimental results the authors can formulate the conclusions and observations. It should be emphasized that they refer only to a certain group of concretes, of which the concrete subjected to the tests presented in this paper may be representative.

The tests results carried out on cubic specimens can be summarized as follows:

- the changes in properties determined by non-destructive methods (L and V) are qualitatively convergent [Fig. 3] with the changes of mechanical properties (f_c , f_t , E).
- quantitatively [Fig. 3], the best compliance of the ultrasonic pulse velocity tested in direct transmission with specimen compressive strength was found.

Podziękowania

Badania prowadzono dzięki wsparciu finansowemu Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu badawczego N N506 045040.

Literatura / References

1. I. Hager, Behaviour of cement concrete at high temperature (2013) Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences 61 (1), pp. 145 - 154 doi: 10.2478/bpasts-2013-0013.
2. I. Hager, Metody oceny stanu betonu w konstrukcji po pożarze Cement Wapno Beton, **76**, 167-178 (2009).
3. M. Colombo, R. Felicetti, New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures, Fire Safety Journal, **42**, 461-472 (2007).
4. I. Hager, Wytrzymałość na ściskanie i prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonach zwykłych i wysokowartościowych poddanych działaniu wysokiej temperatury, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, **276**, 307-312 (2007).
5. B. Stawiski, Ultradźwiękowe badania betonów i zapraw głowicami punktowymi, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.

The results of the research conducted on the slab allow for the following conclusions:

- the ultrasonic pulse velocity method using surface transmission proved to be of rather poor applicability, since the degree of damage in the form of a network of cracks precluded a reliable measurement of this velocity;
- the ultrasonic pulse velocity method proved to be useful for taking measurements in the direct transmission, done for core drillings; it allowed a reliable assessment of the degree of damage in the concrete along the peripheral of the cylinders cored from the heated element. Moreover, the consistent correlation of the ultrasonic pulse velocity and compressive strength was found [Fig. 8c].

Acknowledgements

This study had the financial support of the National Science Centre as part of the research project N N506 045040.