ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1975

Seria: Górnictwo z. 68 Nr kol. 461

Mirosław Chudek, Stanisław Janiczek,
Jan Boryczko, Ryszard Majchrzak

BADANIA LABORATORYJNE NAD ULTRADŹWIĘKOWĄ METODĄ "V" POMIARU WYTRZYMAŁOŚCI I GRUBOŚCI GÓRNICZYCH OBUDÓW BETONOWYCH

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych nad sposobem pomiaru wytrzymałości i grubości górniczych obudów betonowych, polegającym na wyznaczeniu prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej przy ustawieniu głowic nadawczej i odbiorczej w układzie "V". Metoda pozwala na wykonywanie pomiarów z jednej dostępnej płaszczyzny obudowy, a uzyskane wyniki świadczą o jej dużej dokładności.

1. Wprowadzenie

Betonowe obudowy wyrobisk kapitalnych narażone są na działania dużych ciśnień i pracując często w trudnych warunkach hydrogeologicznych, muszą gwarantować długi okres eksploatacji wyrobisk. Dlatego też istnieje konieczność dokładnego określenia zmieniającej się podczas eksploatacji wyrobisk, wytrzymałości R_c wykonanej obudowy.

Stosowane obecnie nieniszczące badania sklerometryczne (np. z wykorzystaniem młotka Schmidta) polegające na pomiarze wielkości odskoku ciężaru po uderzeniu w beton, określają wytrzymałość powierzchniową warstwy betonu obudowy, która w istotny sposób różni się od wytrzymałości warstw głębszych.

Wytrzymałość betonu określona metodą sklerometryczną jest obciążona błędem $\pm$ 30% [2].

Również małą dokładność otrzymuje się przy określeniu wytrzymałości wyciętych z obudowy próbek betonu przez ich niszczenie w prasie. Powodowane to jest częściowym uszkodzeniem struktury betonu podczas wycinania próbek oraz odmiennymi warunkami techniczno-klimatycznymi towarzyszącymi badaniom.

W związku z coraz szerszym stosowaniem w górnictwie obudów betonowych, zaistniała konieczność opracowania takiej praktycznej metody, która pozwoliłaby w sposób nieniszczący i możliwie dokładny określać wytrzymałość betonu na całym przekroju obudowy. W Instytucie Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni prowadzone są aktualnie prace nad określeniem wytrzymałości i grubości obudów betonowych z zastosowaniem ultradźwiękowej metody "V" pozwalającej na wykonanie pomiarów z dostępnej płaszczyzny obudowy.

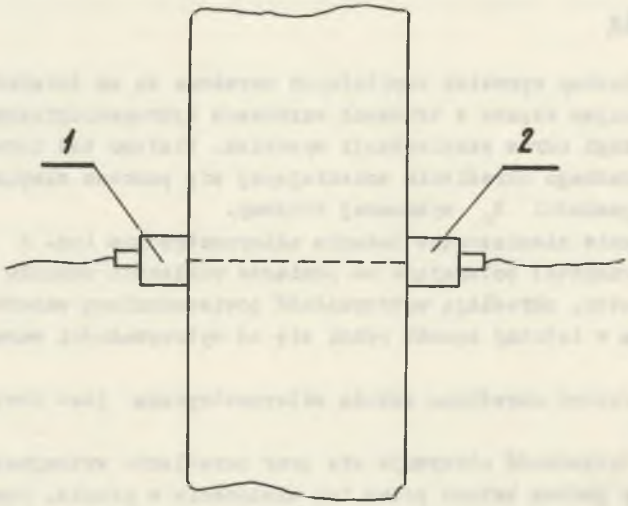
2. Założenia ultradźwiękowej metody "V"

W dotychczas stosowanych ultradźwiękowych pomiarach wytrzymałości betonu, mierzono prędkość podłużnej fali ultradźwiękowej przepuszczanej przez beton, przy układzie głowic jak na rys. 1a.
W tym wypadku prędkość podłużnej fali określa się wzorem:

$$C_L = \frac{E_o\,(1-\nu)}{\varrho\,(1+\nu)\,(1-2\nu)}$$

gdzie:

C_L - prędkość fali podłużnej
E_o - dynamiczny współczynnik sprężystości
ν - współczynnik Poissona
ϱ - gęstość ośrodka.



Rys. 1a. Układ głowic nadawczej 1 i odbiorczej 2 do pomiaru prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej metodą przepuszczania w betonie

Wykorzystując korelację pomiędzy wytrzymałością betonu R_c a jego współczynnikiem sprężystości E_o przy małej zmienności ν oraz ϱ wnioskuje się że prędkość przewodzenia fali podłużnej C_L jest funkcją wytrzymałości betonu R_c.
Badania prowadzone w Instytucie Techniki Budowlanej w Warszawie pozwoliły na wyznaczenie funkcji regresji [2]

$$R_c = f(C_L)$$

$$R_c = 24{,}34\,C_L^2 - 71{,}954\,C_L + 42{,}726 \qquad (1)$$

W praktyce wytrzymałość R_c betonu odczytuje się z nomogramów opracowanych na podstawie powyższego równania, uwzględniających wiek betonu, rodzaj cementu, stosunek C/W, uziarnienie kruszywa, sposób zagęszczenia oraz wilgotności betonu. Pomiaru prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej C_L dokonuje się betonoskopem, stosując układ głowic jak na rys. 1a. Warunki wykonania górniczej obudowy betonowej uniemożliwiają stosowanie powyższej metody, dlatego też autorzy proponują stosowanie ultradźwiękowej metody "V".

Zasadniczą ideą ultradźwiękowej metody "V" jest realizacja pomiaru prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej w warunkach dostępu do jednej płaszczyzny badanej obudowy betonowej (rys. 1b).

Układ: obudowa betonowa - ocios, którego ośrodki posiadają różne charakterystyki akustyczne, spełnia warunki dla realizacji odbicia fali ultradźwiękowej. Odbicie to odbywa się na granicy faz według wzoru:

$$K_J = \frac{J\ odb}{J\ pad} = \left(\frac{\varrho_2\ C_2 - \varrho_1\ C_1}{\varrho_2\ C_2 + \varrho_1\ C_1}\right)^2,$$

gdzie:

- K_J - współczynnik odbicia
- J odb - natężenie fali odbitej
- J pad - natężenie fali padającej
- $\varrho_1 C_1$ - falowa oporność akustyczna obudowy betonowej
- $\varrho_2 C_2$ - falowa oporność akustyczna skał ociosu.

Fala ultradźwiękowa wprowadzona głowicą nadawczą 1 pod kątem α z dostępnej powierzchni obudowy betonowej, ulega odbiciu na granicy obudowa-ocios i wraca do głowicy odbiorczej 2 rys. 1b. W celu realizacji pomiaru prędkości metodą "V" wykonano nasadki z polimetakrylanu metylu na głowice: nadawczą i odbiorczą umożliwiające wprowadzenie fali ultradźwiękowej w beton pod kątem $\alpha = 30^o$. W betonie fala ulega załamaniu i rozchodzi się pod kątem γ, według wzoru:

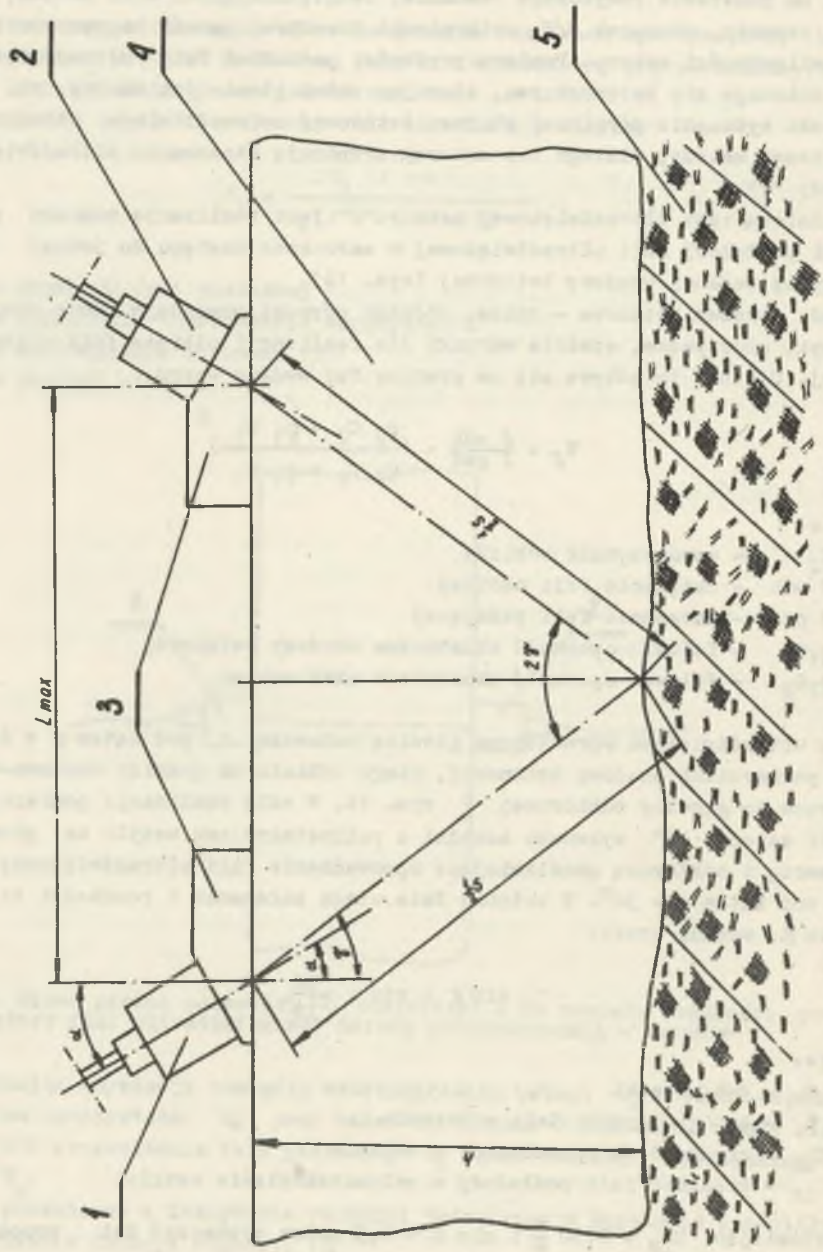
$$\sin\gamma = \sin\alpha\ \frac{C_{LO}}{C_{LN}},$$

gdzie:

- α - kąt nasadki
- γ - kąt propagacji fali w betonie
- C_{LO} - prędkość fali podłużnej w betonie
- C_{LN} - prędkość fali podłużnej w polimetakrylenie metylu,

podstawiając $C_{LN} = 2730\ \frac{m}{s}$ i $\sin\alpha = 0,5$ można wyznaczyć kąt propagacji fali w betonie:

$$\gamma = \arcsin\ \frac{C_{LO}}{5460}$$



Rys. 1b. Układ głowic do pomiaru prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej metodą "V"
1 - głowica nadawcza, 2 - głowica odbiorcza, 3 - nasadki z polimetakrylanu metylu, 4 - beton badanej obudowy
5 - skały ociosu, α - kąt wprowadzenia fali ultradźwiękowej w beton obudowy, h - grubość obudowy

Wzór ten wskazuje, że kąt ϑ pod jakim odbywa się propagacja fali ultradźwiękowej w betonie jest zależny od prędkości fali podłużnej. Odczytując z betonoskopu czas t przejścia fali przez beton obudowy oraz mierząc odległość L_{max} pomiędzy głowicą nadawczą i odbiorczą, zapewniającą odbiór maksymalny energii falii, wyznaczamy prędkość fali w betonie ze wzoru:

$$C_{LO} = 73,89\sqrt{\frac{L_{max}}{t}}. \qquad (2)$$

Natomiast grubość betonu wyznacza się w nowej metodzie wg wzoru:

$$h = \frac{L_{max}}{2 \text{ tg arc . sin } \frac{C_{LO}}{5460}}. \qquad (3)$$

3. Przebieg i wyniki badań laboratoryjnych

Do badań laboratoryjnych wykonano próbki o wymiarach podstawy 450 x 250 i zmiennej wysokości h, stosując beton o różnym stosunku C/K, różnym uziarnieniu kruszywa, z zamodelowanymi nierównościami, które uzyskano przez połączenie betonu z łupkiem węglowym zastępującym skały ociosu (tabl. 1). Dla każdej próbki dokonano pomiaru czasu przejścia fali ultradźwiękowej metodą "V" i otrzymaną po przeliczeniu wzorem (2) prędkość porównano z prędkością otrzymaną dla metody przepuszczania. Pomiar czasu przejścia fali ultradźwiękowej dokonany był przy pomocy betonoskopu Bi-8R-M66, stosując głowice nadawczo-odbiorcze o częstotliwości 500 kHz.

Dla realizacji pomiaru metodą "V" wykonano z polimetakrylanu metalu nasadki na głowice, zapewniające wprowadzenie fali ultradźwiękowej w beton pod kątem $\alpha = 30^{o}$.

Dla zapewnienia sprzężenia akustycznego między nasadką a powierzchnią badanego betonu wprowadzono warstwę towotu. Dla sprawdzenia słuszności założeń metody "V" dokonano dla tych samych próbek porównania prędkości ultradźwiękowej fali podłużnej otrzymanej dla metody "V" z prędkością uzyskaną w metodzie przepuszczania.

Przy odczycie czasu przejścia fal ultradźwiękowych, eliminowano wpływ powstającej fali powierzchniowej przez: wstępne wytłumienie sygnału odbieranego, dokonywanie odczytu jak na rys. 4 z pominięciem impulsów początkowych oraz stosowanie małego kąta propagacji fal (w badaniach 30°).

Porównując wyniki otrzymane przy pomiarze prędkości metodą "V" z wynikami otrzymanymi z metody przepuszczania należy stwierdzić że największa względna odchyłka prędkości wynosi 3,6%, przy czym odchyłka ta dotyczy próbki z największymi z zamodelowanych nierówności o wysokości 8 cm.

Sprawdzając dokładność pomiaru wykonywanego metodą "V" przeprowadzono serię pomiarów, które zestawiono za pomocą szeregu rozdzielczego (tablica 2).

Tablica 1

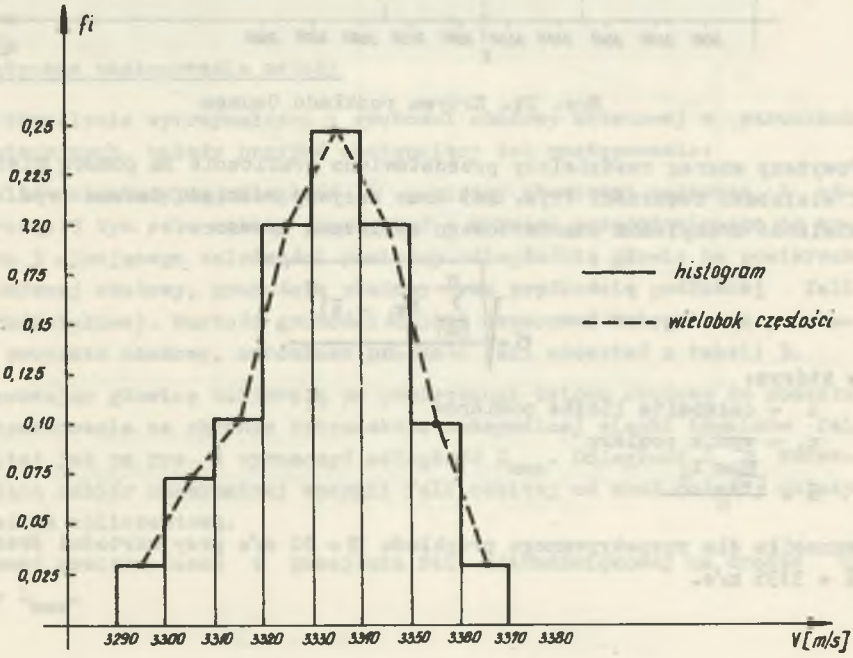
Lp.	Uwagi dotyczące badanych próbek				Prędkość fali ustalona metodą V [m/s]	Prędkość fali ustalona metodą przepuszczania [m/s]
	Kruszywo Ø [mm]	Stosunek cement: kruszywo C/K	Grubość h [cm]	Wysokość nierówności powierzchni ociosu hn [cm]		
1	0,54	1:3	22	0	3380	3450
2	0,54÷1,1	1:3	22	0	3600	3615
3	2,0 ÷7,3	1:3	22	0	3370	3419
4	0,0 ÷ 20	1:2	22	0	3500	3534
5	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3690	3672
6	0,0 ÷ 20	1:4	22	0	3575	3600
7	0,0 ÷ 20	1:5	22	0	3490	3440
8	0,0 ÷ 20	1:6	22	0	3075	3100
9	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3610	3630
10	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3460	3520
11	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3455	3530
12	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3405	3430
13	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3620	3630
14	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3540	3530
15	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3675	3640
16	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3350	3300
17	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3720	3720
18	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3490	3550
19	0,0 ÷ 20	1:3	22	0	3550	3320
20	0,0 ÷ 20	1:3	30	0	3280	3375
21	0,0 ÷ 20	1:3	35	0	3370	3460
22	0,0 ÷ 20	1:3	33-35	2	3440	3470
23	0,0 ÷ 20	1:3	31-35	4	3410	3400
24	0,0 ÷ 20	1:3	29-35	6	3430	3440
25	0,0 ÷ 20	1:3	27-35	8	3320	3440

Tablica 2

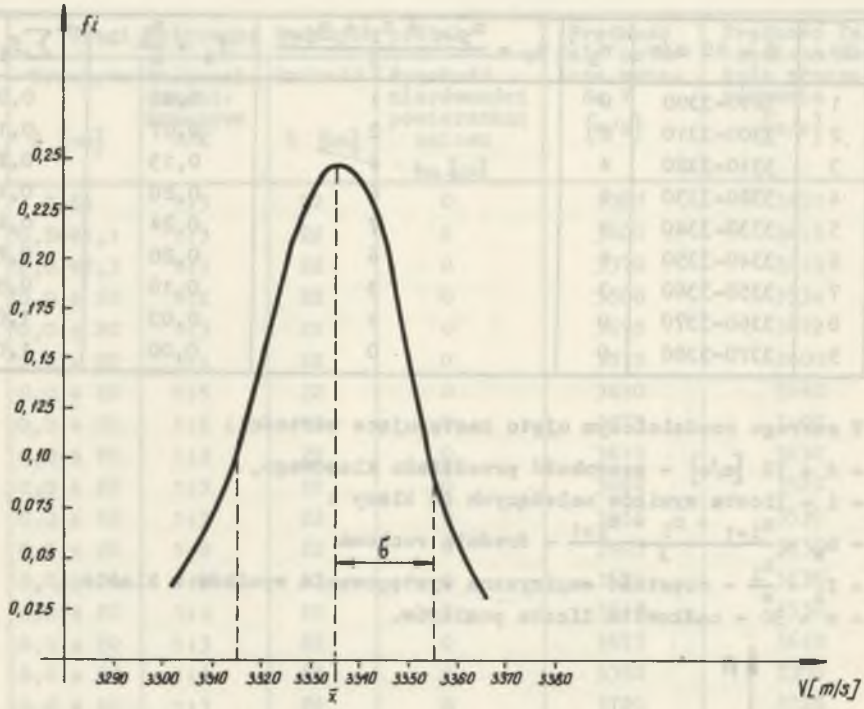
Lp.	d = 10 m/s	n_i	$n_w = \frac{n_{i-1} + n_i + n_{i+1}}{3}$	$f_i = \frac{n_i}{n}$	$\sum f_i$
1	3290-3300	0	1	0,03	0,03
2	3300-3310	2	2	0,07	0,10
3	3310-3320	4	4	0,13	0,23
4	3320-3330	6	6	0,20	0,43
5	3330-3340	9	7	0,24	0,67
6	3340-3350	6	6	0,20	0,87
7	3350-3360	3	3	0,10	0,97
8	3360-3370	0	1	0,03	1,00
9	3370-3380	0	0	0,00	1,00

W szeregu rozdzielczym ujęto następujące wartości:

- d = 10 [m/s] - szerokość przedziału klasowego,
- i - liczba wyników należących do klasy i
- $n_w = \frac{n_{i-1} + n_i + n_{i+1}}{3}$ - średnia ruchoma
- $f_i = \frac{n_i}{n}$ - częstość empiryczna występowania wyników w klasie i
- n = 30 - całkowita liczba pomiarów.



Rys. 2a. Wykres histogramu i wieloboku częstości



Rys. 2b. Krzywa rozkładu Gaussa

Powyższy szereg rozdzielczy przedstawiono graficznie za pomocą histogramu i wieloboku częstości (rys. 2a) oraz krzywej rozkładu Gaussa (rys. 2b). Wielkość odchylenia standartowego obliczana wg wzoru:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n}},$$

w którym:

n - całkowita liczba pomiarów

x_1 - wynik pomiaru

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$$

wynosiła dla rozpatrywanego przykładu σ = 20 m/s przy wartości średniej $\bar{x}$ = 3335 m/s.

Dokładność pomiaru, przy uwzględnieniu powszechnie przyjętego w badaniach statystycznych poziomu ufności p = 0,95 można określić z zależności:

$$P(\bar{x} - 2\sigma) < X < (X + 2\sigma) = 0{,}95,$$

gdzie:

P = 0,95 - prawdopodobieństwo otrzymania wyniku pomiaru X w granicach $(\bar{x} - 2\sigma)$, $(\bar{x} + 2\sigma)$.

Tak więc w omawianym przykładzie z prawdopodobieństwem P = 0,95 otrzymaliśmy wyniki w granicach 3295 m/s ÷ 3375 m/s.
Oznacza to, że maksymalny błąd pomiaru popełniany przy stosowaniu metody "V" może wynosić około 1,2%. W praktyce błąd ten jest o wiele mniejszy. Duża dokładność pomiaru jak i niewielka wartość względnej odchyłki prędkości uzyskanej dla metody "V" i metody przepuszczania pozwala na zastosowanie do określenia wytrzymałości beton obudowy, funkcji regresji określonej wzorem (1). Plan prac naukowo-badawczych Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej przewiduje ustalenie równania regresji dla metody "V" w związku z czym należy oczekiwać dalszego poprawienia dokładności w określeniu wytrzymałości obudów betonowych.

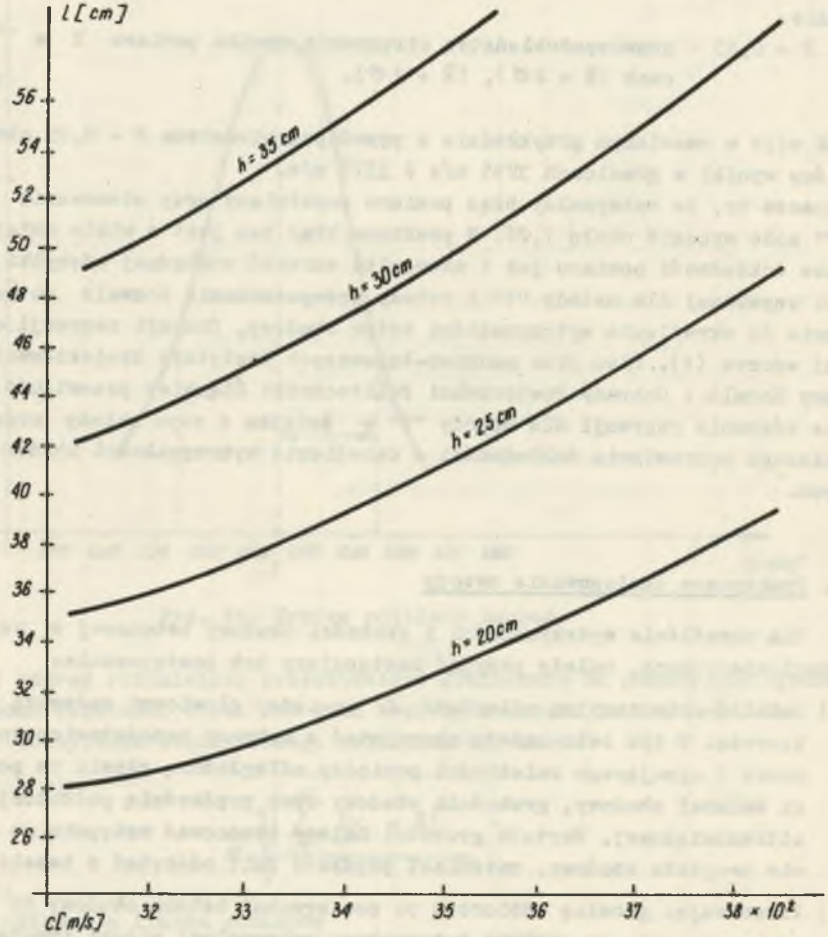
4. Praktyczne zastosowanie metody

Dla określenia wytrzymałości i grubości obudowy betonowej w warunkach eksploatacyjnych, należy przyjąć następujący tok postępowania:

a) Ustalić orientacyjną odległość L pomiędzy głowicami nadawczą i odbiorczą. W tym celu należy skorzystać z wykresu przedstawionego na rysunku 3 ujmującego zależności pomiędzy odległością głowic na powierzchni badanej obudowy, grubością obudowy oraz prędkością podłużnej fali ultradźwiękowej. Wartość grubości należy oszacować wstępnie na podstawie projektu obudowy, natomiast prędkość fali odczytać z tabeli 3.

b) Przesuwając głowicę odbiorczą po powierzchni betonu obudowy do momentu zaobserwowania na ekranie betonoskopu maksymalnej wiązki impulsów fal odbitej jak na rys. 4 wyznaczyć odległość L_{max}. Odległość L_{max} zapewniającą odbiór maksymalnej energii fali odbitej od skał ociosu, należy uznać za obliczeniową.

c) Dokonać pomiaru czasu t przejścia fali ultradźwiękowej na drodze s przy L_{max}.



Rys. 3. Wykres $L=f(C_L)h$ = const dla orientacyjnego ustalenia rozstawu głowic

Tablica 3

Jakość betonu	Prędkość fali podłużnej	Orientacyjna wytrzymałość na ściskanie R_c N/m^2
Bardzo zła	poniżej 2000	-
Zła	2000 - 3000	do 40 x 10^5
Niezbyt dobra	3000 - 3500	do 100 x 10^5
Dobra	3500 - 4000	do 250 x 10^5
Bardzo dobra	4000 - 4500	do 400 x 10^5
Doskonała	ponad 4500	ponad 400 x 10^5

Rys. 4. Impuls odebranej fali ultradźwiękowej po przejściu przez beton przy rozstawie głowic równym L_{max} obserwowany na ekranie betonoskopu

d) Wyznaczyć prędkość fali ultradźwiękowej w betonie według wzoru:

$$C_{LO} = a\sqrt{\frac{L_{max}}{t}},$$

gdzie:

a - współczynnik zależny od kąta nasadki oraz od prędkości fali ultradźwiękowej w polimetakrylanie metylu.

W badaniach gdzie zastosowano kąt $\alpha = 30^o$ oraz nasadkę z polimetakrylanu metylu wartość a wynosiła 73,89. Tablica nr 4 podaje wartości a dla różnych kątów nasadek z polimetakrylanu metylu.

Tablica 4

α	15°	30°	45°	60°
a	102,8	73,89	60,98	56,14

e) Dokładną wartość grubości obudowy h wyznaczamy wzorem:

$$h = \frac{L_{max}}{2\ tg\gamma},$$

w którym

$$\gamma = \arcsin \frac{C_{LO} \sin\alpha}{C_{LN}}.$$

5. Spostrzeżenia i wnioski

1. Na podstawie badań należy stwierdzić, że ultradźwiękowa metoda "V" może znaleźć zastosowanie do pomiarów parametrów fali ultradźwiękowej w warunkach jednostronnego dostępu do badanej płaszczyzny.
Pozwala to również na określenie aktualnej i zmiennej w czasie wytrzymałości górniczej obudowy betonowej i jej grubości w warunkach eksploatacyjnych.

2. Określenie wytrzymałości betonu ultradźwiękową metodą przypuszczania z zostało uznane przez Międzynarodową Unię Laboratoriów Badania Materiałów i Konstrukcji w Paryżu za metodę najdokładniejszą z metod nieniszczących. Porównując prędkości fali ultradźwiękowej w betonie otrzymane z pomiaru metodą przepuszczania z prędkościami wyznaczonymi z zastosowaniem nowej metody "V" stwierdzono, że największa względna odchyłka prędkości wynosi 3,6%. Otrzymanie tak niewielkiej odchyłki prędkości jak i duża dokładność pomiaru pozwala na stwierdzenie, że nowa metoda "V" powinna znaleźć szerokie zastosowanie w badaniach konstrukcji przy jednostronnym dostępie do badanej płaszczyzny.
Zwiększenie dokładności pomiaru można uzyskać przez określenie dla każdej receptury betonu indywidualnej krzywej regresji $R_c = f(C_L)$.

3. Przedstawioną w artykule metodę "V" przeanalizowano na przykładzie górniczych obudów betonowych tj. układu beton skała. Określenie wytrzymałości i grubości konstrukcji betonowych metodą "V" można realizować przy innych układach np. beton - powietrze, beton - ciecz itp.
Powyższą metodę można również stosować dla układu innych materiałów pod warunkiem wcześniejszego wyznaczenia funkcji regresji ($R_c = f/C_L$) dla badanego materiału.

6. Literatura

[1] M. Chudek: Górnictwo tom VII. Obudowa wyrobisk cz. II Śląsk Katowice 1968 r.

[2] L. Brunarski i inni: "Budownictwo betonowe" tom VIII. "Badanie materiałów elementów i konstrukcji" "Arkady" Warszawa 1970 r.

[3] Filipczycki, Z. Pawłowski, J. Wehr: "Ultradźwiękowe metody badań materiałów" WNT Warszawa 1963 r.

[4] T. Tomaka: "Ultradźwiękowe badania obudów betonowych". Praca dyplomowa, Gliwice 1974 r. (praca nieopublikowana).

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАД НОВЫМ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ И ТОЛЩИНЫ БЕТОННЫХ ГОРНЫХ КРЕПЕЙ

Р е з ю м е

В статье представлены результаты лабораторных измерений устойчивости и толщины бетонных крепей путём определения скорости продольной ультразвукокой волны при установке трансмлирующих и приёмных головок в системе Этот метод позволяет производить измерения только с одной доступной поверхности крепи, а полученные результаты свидетельствуют о высокой точности метода.

LABORATORY TESTS ON ULTRASONIC "V" METHOD OF MEASURING THE STRENGTH AND THICKNESS OF MINING CONCRETE LININGS

S u m m a r y

The presented laboratory tests for determination of mining concrete strengthand thickness are based on ultrasonic longitudinal waves velocity measurements with transmitter and receiver heads positioned on an accessible lining plane.