

prof. dr hab. inż. Jerzy Jasieńko¹⁾
 dr inż. Andrzej Moczko^{1)*}
 dr inż. Marta Moczko¹⁾

Badania cech betonu w konstrukcji wsporczej kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu

*Testing the properties of concrete in the supporting structure
of the dome of the Centennial Hall in Wrocław*

DOI: 10.15199/33.2015.11.29

(Oryginalny artykuł naukowy)

Streszczenie. Przedstawione wyniki badań dokumentują obecny stan techniczny betonu w konstrukcji wsporczej kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu po upływie ok. 100 lat. Są unikatowym źródłem informacji o jakości betonu z początku XX w. Badania wykazały m.in., że cechy wytrzymałościowe betonu pozwalają na oszacowanie jego klasy wytrzymałości jako C20/25. Na podkreślenie zasługuje uzyskana wartość nasiąkliwości, wynosząca średnio ok. 4,3%, którą biorąc pod uwagę poziom technologii betonu na początku ubiegłego wieku, uznać należy za nadspodziewanie dobrą.

Słowa kluczowe: beton, właściwości mechaniczne, nasiąkliwość, karbonatyzacja.

Abstract. Presented results of carried out research dokument current technical condition of concrete in supporting structure of the Centennial Hall in Wrocław after about 100 years. These results are quite unique source of information about the quality of concrete from the beginning of the 20th century. The obtained data show, among other things, that strength parameters of tested concrete meet the current requirements for strength class C20/25. It is also worth of mention that average value of obtained absorbability is equal to about 4.3%, which, considering the level of concrete technology at the beginning of the previous century should be considered a surprisingly good result.

Keywords: concrete, mechanical properties, absorbability, carbonation.

Hala Stulecia we Wrocławiu została oddana do użytkowania w 1913 r. z okazji Wystawy Stulecia, zorganizowanej w celu uczczenia setnej rocznicy zwycięstwa nad Napoleonem. Pomysłodawcą, a zarazem głównym projektantem tej niezwykłej konstrukcji był niemiecki architekt i konstruktor Max Berg. 13 lipca 2006 r. Hala Stulecia została wpisana na Listę Światowego Dziedzictwa UNESCO jako pionierskie osiągnięcie inżynierii i architektury XX stulecia. Konstrukcję Hali Stulecia tworzą dwa niezależne żelbetowe układy konstrukcyjne. Podstawę stanowi układ czterech głównych filarów podporowych (fotografia 1), tworzących cztery wielkie arkady absyd o rozpiętości 41 m i wysokości 16,7 m, a górną część konstrukcji kopuła o średnicy 65 m i wysokości 23 m, składająca się z 32 żelbetowych żeber opartych u dołu na rozciągającym pierścieniu głównym, a u góry związanych w ścisłanym pierścieniu betonowym o średnicy 14,4 m [1].

W artykule przedstawiono wyniki badań cech mechanicznych i fizycznych betonu w filarach podporowych, stanowiących konstrukcję wsporczą kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu [2].



Fot. 1. Widok jednego z filarów wspierających kopułę Hali Stulecia

Photo 1. View of one of the pillars supporting the dome of Centennial Hall

Opis badań

Badania poligonowe przeprowadzono w maju i czerwcu 2015 r. Obejmowały one określenie wytrzymałości betonu na ścisłkanie na podstawie badań laboratoryjnych odwiertów rdzeniowych. Łącznie pobrano osiem odwiertów, po dwa z każdego z czterech filarów, o średnicy ok. 100 mm i długości 12 ÷ 35 cm, oznaczając je jako: A1 i A2 (filar A, pomiędzy sektorami A i B), B1 i B2 (filar B, pomiędzy sektorami B i C), C1 i C2 (filar C, pomiędzy sektorami C i D) oraz D1 i D2 (filar D, pomiędzy sektorami D i A). Następnie wycięto z nich próbki laboratoryjne o wymiarach $h \approx \phi \approx 100$ mm, oznaczając je analogicznie jak odwierty. Badania wytrzymałości na ścisłkanie i rozłupanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej. W celu zapewnienia równoległości powierzchni czolowych próbek badanych na ścisłkanie, do-

stosowano je do badań za pomocą kapsłowania nakładkami piaskowymi [3]. W związku z tym, że stwierdzono zaawansowaną karbonatyzację przypowierzchniową warstwy betonu (od 25 do 70 mm), oceny wytrzymałości betonu na rozciąganie dokonano metodą brazylijską, zgodnie z PN-EN 12390-6:2011. Określono również ciężar objętościowy betonu, jego nasiąkliwość oraz zasięg karbonatyzacji przekroju betonowego za pomocą testu fenoftaleinowego.

Wyniki badań

Ogledziny pozyskanych odwiertów kontrolnych wykazały, że struktura betonu w badanych filarach podporowych jest wyraźnie zróżnicowana i charakteryzuje się wyjątkową niejednorodnością (fotografia 2). Obok kruszywa granitowego o bardzo dużym uziarnieniu stwierdzono obecność kruszywa naturalnego o niewspółmiernie drobnym uziarnieniu. Zły skład granulometryczny stosu okruszowego był źródłem znacznej lokalnej niejednorodno-



Fot. 2. Odwiert C2 – niewłaściwy dobór uziarnienia kruszywa

Fig. 2. Core C2 – wrong aggregate grading

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
^{*)} Autor do korespondencji:
 e-mail: andrzej.moczko@pwr.edu.pl

ści struktury betonu. Wady wewnętrzne betonu wynikały z utrudnionego zagęszczenia mieszanki betonowej oraz dużego zróżnicowania uzyskiwanych wartości wytrzymałości betonu na ściskanie. Wyniki badań wytrzymałościowych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie

Table 1. The results of testing concrete compressive strength

Oznaczenie próbki	Przekrój F [mm ²]	Sila P [kN]	Gęstość pozorna [kg/m ³]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
A1 (filar A)	7982	236	2243	29,6
A2 (filar A)	7986	342	2260	42,8
B1/1 (filar B)	8592	354	2250	41,2
B1/2 (filar B)	8589	360	2270	41,9
B2 (filar B)	8577	176	2130	20,5
C1 (filar C)	8533	400	2310	46,9
D1 (filar D)	7847	270	2310	34,4

Uzyskane wyniki charakteryzują się następującymi parametrami:

- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie $f_{cm(core)} = 36,7$ MPa;
- najmniejsza uzyskana wytrzymałość $f_{core, lowest} = 20,5$ MPa;
- odchylenie standardowe wytrzymałości $s = 9,2$ MPa;
- współczynnik zmienności wytrzymałości $v = 25,0\%$;
- średnia gęstość pozorna $\rho = 2252$ kg/m³.

Zgodnie normą PN-EN 13791:2008 przyjęto, że wytrzymałość charakterystyczna badanego betonu, odpowiadająca wytrzymałości oznaczanej na próbkach sześciennych o wymiarach 150 x 150 x 150 mm ($f_{ck, is, cube}$), jest mniejszą z dwóch wartości:

$$f_{ck, is, cube} \leq f_{cm(core)} - k \text{ i } f_{ck, is, cube} \leq f_{core, lowest} + 4$$

gdzie: dla $n = 7$ przyjęto $k = 6$ i otrzymano

$$f_{ck, is, cube} \leq 36,7 - 6 = 30,7 \text{ MPa oraz}$$

$$f_{ck, is, cube} \leq 20,5 + 4 = 24,5 \text{ MPa}$$

Na podstawie uzyskanych wyników badań można przyjąć wytrzymałość charakterystyczną badanego betonu jako nie większą niż 24,5 MPa. Zgodnie z normą PN-EN 13791:2008 klasę betonu oszacowano jako C20/25. Badania wykazały również, że **średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie** wg metody brazylijskiej wyniosła 2,65 MPa (tabela 2).

Badania nasiąkliwości betonu (tabela 3) przeprowadzono na próbkach wyciętych z fragmentów odwiertów rdzeniowych, pobranych z filarów podporowych. Należy stwierdzić, że uzyskane wyniki są zaskakujące, ponieważ wartości nasiąkliwości są bardzo małe i mieszczą się w przedziale $3,47 \div 5,51\%$, co jest często trudne do osiągnię-

cia przy obecnym poziomie technologii betonu. Średnia wartość nasiąkliwości badanego betonu wyniosła ok. 4,3% i jest niższa od wartości przyjmowanej obecnie za wartość akceptowalną (5%). Współczynnik zmienności uzyskanych wyników wyniósł ok. 12,4%, co świadczy o dużej jednorodności tej cechy betonu.

Badania zasięgu procesu karbonatyzacji wykazały, że grubość przypowierzchniowej warstwy badanego betonu, która uległa procesowi karbonatyzacji, jest bardzo zróżnicowana i jej wartość wynosi $25 \div 70$ mm (fotografia 3). Wyniki badań:

- **filar A** → uśredniona grubość warstwy skarbonatyzowanej wynosi ok. 28 mm; – **odwiert A1** → grubość warstwy skarbonatyzowanej: ok. 25 mm; – **odwiert A2** → grubość warstwy skarbonatyzowanej: ok. 30 mm;
- **filar B** → uśredniona grubość warstwy skarbonatyzowanej wynosi ok. 65 mm; – **odwiert B1** → grubość warstwy skarbonatyzowanej: ok. 60 mm; – **odwiert B2** → grubość warstwy skarbonatyzowanej (fotografia 3): ok. 70 mm;

Tabela 2. Wyniki badania wytrzymałości betonu na rozciąganie f_t

Table 2. The results of testing concrete tensile splitting strength f_t

Oznaczenie próbki	Wartość siły niszczącej [N]	L ^{*)} [mm]	d ^{*)} [mm]	f_t [MP]
A1/1 (filar A)	42000	100,92	100,86	2,63
B1/3 (filar B)	57500	105,03	104,62	3,33
C2 (filar C)	37500	104,30	104,30	2,18
D2 (filar D)	42000	103,81	104,61	2,46

L, d – wymiary próbki odpowiednio: długość, średnica

Tabela 3. Wyniki oznaczenia nasiąkliwości betonu

Table 3. The results of the measurements of concrete absorptivity

Oznaczenie próbki	Masa próbki nasyczonej [g]	Masa próbki w stanie suchym [g]	Nasiąkliwość [%]	Średnia nasiąkliwość [%]
A1/A (filar A)	196,08	187,56	4,54	4,99
A1/B (filar A)	130,37	123,62	5,46	
A1/C (filar A)	630,27	600,32	5,00	
A1/1 (filar A)	872,26	831,00	4,96	4,15
B1/1/A (filar B)	259,03	248,97	4,04	
B1/1/B (filar B)	757,96	726,63	4,31	
B1/2 (filar B)	289,43	277,86	4,16	4,10
B1/3 (filar B)	977,04	938,57	4,10	
C1/A (filar C)	245,33	235,95	3,97	
C1/B (filar C)	350,81	336,75	4,17	4,42
C1/C (filar C)	1007,07	967,93	4,04	
C2 (filar C)	668,80	633,85	5,51	
D1/A (filar D)	254,49	245,41	3,70	3,71
D1/B (filar D)	245,43	236,73	3,67	
D1/C (filar D)	479,65	463,58	3,47	
D2 (filar D)	971,44	934,19	3,99	



Fot. 3. Odwiert B2 (głębokość karbonatyzacji – 70 mm)

Photo 3. Core B2 (depth of carbonation – 70 mm)

- **filar C** → uśredniona grubość warstwy skarbonatyzowanej wynosi ok. 52 mm; – **odwiert C1** → grubość warstwy skarbonatyzowanej: ok. 35 – 40 mm; – **odwiert C2** → grubość warstwy skarbonatyzowanej: ok. 60 – 70 mm;
- **filar D** → uśredniona grubość warstwy skarbonatyzowanej wynosi ok. 34 mm; – **odwiert D1** → grubość warstwy skarbonatyzowanej: ok. 40 – 45 mm; – **odwiert D2** → grubość warstwy skarbonatyzowanej: ok. 25 mm.

Podsumowanie

Badania betonu filarów podporowych kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu wykazały bardzo dobry jego stan techniczny. Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie wyniosła ok. 36,7 MPa, co pomimo dużej wartości współczynnika zmienności (25%), pozwalała na oszacowanie jego klasy jako C20/25. Dużą wytrzymałość betonu potwierdziły także wyniki badania wytrzymałości betonu na rozciąganie metodą brazylijską, zgodnie z którą średnia wytrzymałość kształtuje się na poziomie ok. 2,65 MPa. Średnia gęstość pozorna betonu wyniosła 2252 kg/m³. Uzyskane wartości nasiąkliwości betonu wynoszą od 3,47 do 5,51% (średnio 4,3%), co jest często trudne do osiągnięcia przy obecnym poziomie technologii betonu. Wyniki te charakteryzują się współczynnikiem zmienności ok. 12,4%, co świadczy o dużej jednorodności tej cechy betonu. W przypadku filarów podporowych grubość przypowierzchniowej warstwy badanego betonu, która uległa procesowi karbonatyzacji, wahała się od ok. 25 do ok. 70 mm. Prace nad pełnym rozpoznaniem właściwości betonu, z którego została wykonana Hala Stulecia we Wrocławiu, są kontynuowane.

Wszystkie fotografie – A. Moczko

Literatura

[1] Ilkosz J., Hala Stulecia i Tereny Wystawowe we Wrocławiu – dzieło Maxa Berga, Muzeum Architektury we Wrocławiu, Wrocław, 2005.
 [2] Jasiętko J., Moczko M., Moczko A., Dżugaj R., Wiad. Konserwatorskie, nr 27/2010, str. 21 – 34.
 [3] Neville A. M., Właściwości betonu, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków, 2000.

Przyjęto do druku: 01.09.2015 r.