

dr inż. Andrzej Moczko^{1*)}
 ORCID: 0000-0002-2492-2283
 mgr inż. Mateusz Moczko²⁾
 ORCID: 0000-0003-2724-9386

Badania betonu w górnym pierścieniu kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu

Examination of the concrete properties in the upper ring of the dome of the Centennial Hall in Wrocław

DOI: 10.15199/33.2022.11.50

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badania jakości betonu w górnym pierścieniu kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu, przeprowadzonego w ramach prac remontowych tego obiektu. Obejmowało ono określenie rzeczywistej wytrzymałości betonu na ściskanie na podstawie badania odwiertów rdzeniowych oraz z wykorzystaniem metody „pull-out”, a także oznaczenie nasiąkliwości oraz ocenę stopnia jego karbonatyzacji. Uzyskane wyniki wykazały, że badany beton charakteryzuje się zaskakująco dobrymi cechami fizyczno-mechanicznymi. Jego parametry wytrzymałościowe odpowiadają obecnym wymaganiom stawianym klasie wytrzymałości C20/25, a bardzo dobrą jakość badanego betonu potwierdziły także wyniki nasiąkliwości, której wartości były zbliżone do 5%. Zbadane parametry są z jednej strony unikatowym źródłem informacji o jakości betonu z początku XX wieku, a z drugiej pozwalają na ocenę trwałości tego tworzywa po upływie stulecia.

Słowa kluczowe: Hala Stulecia; beton historyczny; CAPO-Test; wytrzymałość na ściskanie; nasiąkliwość; karbonatyzacja.

Abstract. The paper presents results of the concrete quality tests in the upper ring of the Centennial Hall dome in Wrocław, carried out as part of the renovation works of this facility. The tests included the determination of the actual compressive strength of concrete on the basis of core drilling tests and the "pull-out" measurements, as well as determination of the water absorption of the tested concrete and assessment of its carbonation degree. The obtained results showed that the tested concrete is characterized by surprisingly good physical and mechanical properties. Its strength parameters correspond to the current requirements for the C20/25 strength class, and the high quality of the tested concrete was also confirmed by the results of the water absorption determination, the values of which were close to 5%. The obtained results are, on the one hand, a unique source of information about the quality of concrete from the beginning of the 20th century, and, on the other hand, allow for the assessment of the conditions of durability of this material after a century.

Keywords: Centennial Hall; historical concrete; CAPO-Test; compressive strength; water absorbability; carbonation.

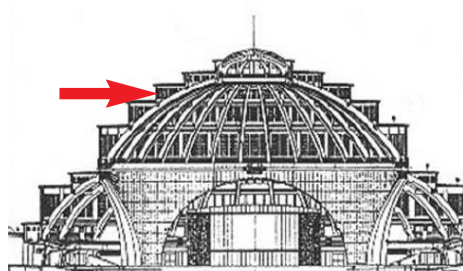
Hala Stulecia we Wrocławiu jest powszechnie uznawana za jeden z kamieni milowych konstrukcji żelbetowych na świecie. Została zaprojektowana przez niemieckiego architekta i konstruktora **Maxa Berga**, we współpracy z **Güntherem Trauerem**, odpowiedzialnym za obliczenia konstrukcyjne [1]. W 2006 r. Hala Stulecia została umieszczona na UNESCO World Heritage List, jako pionierskie osiągnięcie architektury i sztuki budowlanej dwudziestego wieku.

Konstrukcję Hali Stulecia stanowią dwa niezależne od siebie żelbetowe układy konstrukcyjne (rysunek 1). Podstawę stanowią cztery główne filary podporowe, tworzące cztery wielkie arkady absyd o rozpiętości 41 m

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

²⁾ BETARD Sp. z o.o.

^{*)} Adres do korespondencji: andrzej.moczko@pwr.edu.pl



Rys. 1. Schemat konstrukcyjny Hali Stulecia
 Fig. 1. Structural system of Centennial Hall

i wysokości 16,7 m. Górną część konstrukcji stanowi kopuła o średnicy 65 m i wysokości 23 m, składająca się z 32 żelbetowych żeber opartych u dołu na rozciąganym pierścieniu głównym, a u góry związanych w ściskającym pierścieniu betonowym o średnicy 14,4 m, który zaznaczono na rysunku 1 czerwoną strzałką.

W artykule przedstawiono wyniki badania jakości betonu w górnym pierścieniu kopuły i porównano je z uzyskanymi podczas badania cech mechanicz-

nych i fizycznych betonu w innych elementach konstrukcyjnych kopuły Hali Stulecia [2 ÷ 5].

Opis badań

Badania poligonowe betonowe górnego pierścienia, wieńczącego na górze kopuły jej żebra, obejmowały:

- określenie wytrzymałości betonu na ściskanie na podstawie laboratoryjnych badań odwiertów rdzeniowych;
- określenie wytrzymałości betonu na ściskanie na podstawie nieniszczących pomiarów metodą „pull-out”;
- laboratoryjną ocenę nasiąkliwości badanego betonu;
- sprawdzenie głębokości karbonatyzacji przypowierzchniowej warstwy betonu.

Opracowany program badawczy pierścienia górnego zakładał pobranie odwiertów rdzeniowych o średnicy zbli-

zonej do 100 mm, w dziesięciu miejscach pomiarowych, rozmieszczonych równomiernie po obwodzie pierścienia. Wszystkie odwierty pobrano zgodnie z [6] w kierunku zgodnym z kierunkiem betonowania, wycinając je pionowo w dół na górnej powierzchni badanego pierścienia, ze względu na brak innej możliwości.

Oględziny pozyskanych odwiertów kontrolnych wykazały, że badany beton został wykonany na kruszywie bazaltowym z niewielkim dodatkiem kruszywa naturalnego i charakteryzuje się dobrym uziarnieniem (fotografia 1). Z odwiertów rdzeniowych wycięto próbki laboratoryjne o wymiarach $h \approx \phi \approx 100$ mm. Oznaczenia poszczególnych próbek do badań przyjęto analogicznie do oznaczenia odwiertów, z których zostały one wycięte, przy czym w przypadku odwiertu O-1 udało się wyciąć dwie próbki do badań, oznaczając je odpowiednio O-1/A (zewnątrzny fragment odwiertu O-1) oraz O-1/B (fragment odwiertu położony głębiej – od 10 do 20 cm). Do badań wytrzymałościowych w próbce ściskania osiowego przeznaczono próbki oznaczone jako O-1/B, O-2, O-4, O-7, O-8 oraz O-10. Pozostałe, a więc O-1/A,

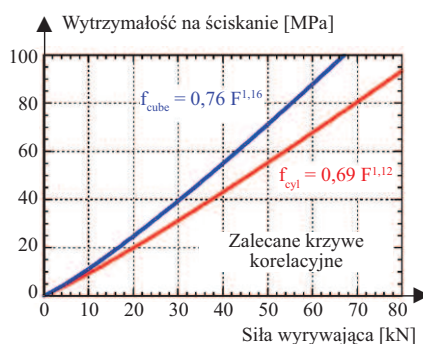


Fot. 1. Struktura badanego betonu na przykładzie odwiertu O-8
Photo 1. The structure of the tested concrete on the example of the core O-8

O-3, O-5, O-6 oraz O-9 wykorzystano do oznaczenia nasiąkliwości badanego betonu. Na powierzchni świeżych przełomów wszystkich próbek określono zasięg karbonatyzacji przypowierzchniowej warstwy betonu.

Niezależnie od badania odwiertów rdzeniowych, w sąsiedztwie ich wycięcia przeprowadzono pomiary wytrzymałości betonu metodą „pull-out” w sześciu miejscach pomiarowych, wykorzystując zestaw pomiarowy CAPO-Test duńskiej firmy Germann Instruments. Jego działanie polega na pomiarze war-

tości siły niezbędnej do wyrwania z betonu stalowej kotwy, którą stanowi stalowy pierścień rozprężany w specjalnie do tego celu wykonanym frezie. Pierścień ten, dzięki właściwemu doborowi proporcji wymiarów do głębokości położenia kotwy oraz wymiarów samej kotwy wymusza złożony stan naprężenia, który w efekcie prowadzi do zniszczenia, charakteryzującego się ścisłą korelacją pomiędzy rejestrowaną siłą wyrrywającą kotew a wytrzymałością betonu na ściskanie (rysunek 2). Korelacja ta ma charakter ogólny, to znaczy jest w zasadzie niezależna od wpływu parametrów materiałowych i technologicznych [7].



Rys. 2. „Pull-out” – zalecane krzywe korelacyjne

Fig. 2. „Pull-out” – recommended correlation curves

Wyniki badań wytrzymałości betonu

Badania wytrzymałości odwiertów rdzeniowych zostały przeprowadzone na próbkach betonowych o wymiarach $h \approx \phi \approx 95$ mm, zgodnie z [8], z wykorzystaniem wzorcowanej maszyny wytrzymałościowej typu Walter BAI. W celu zapewnienia równoległości powierzchni czołowych badanych próbek dostosowano je do badań za pomocą kapslowania nakładkami piaskowymi. Szczegółowe wyniki przeprowadzonych badań zestawiono w tabeli 1.

Uzyskane wyniki są następujące:

- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie $f_{cm, is} = 27,7$ MPa;
- najmniejsza uzyskana wartość wytrzymałości $f_{is, lowest} = 21,7$ MPa;
- odchylenie standardowe wytrzymałości $s = 4,45$ MPa;
- współczynnik zmienności wytrzymałości $n = 16,1\%$;
- średnia wartość gęstości pozornej $\rho = 2339$ kg/m³.

Tabela 1. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie odwiertów rdzeniowych betonu
Table 1. The results of the compressive strength measurements using core specimens

Oznaczenie próbki	Przekrój F	Siła P [kN]	Gęstość pozorna [kg/m ³]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
O-1/B	7003	170	2313	24,3
O-2	7028	244	2383	34,7
O-4	7018	152	2346	21,7
O-7	7020	202	2345	28,8
O-8	7006	202	2346	28,8
O-10	7013	195	2302	27,8

Badania wytrzymałości na ściskanie obejmowały także wykonanie bezpośrednich pomiarów na obiekcie metodą „pull-out” w trybie pomiarowym CAPO-Test. Szczegółowe wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie metodą „pull-out” w przypadku poszczególnych miejsc pomiarowych zestawiono w tabeli 2. Uzyskane wyniki to:

- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie $f_{cm, is} = 42,4$ MPa;
- najmniejsza uzyskana wartość wytrzymałości $f_{is, lowest} = 38,5$ MPa;
- odchylenie standardowe wytrzymałości $s = 3,83$ MPa;
- współczynnik zmienności wytrzymałości $n = 9,0\%$.

Tabela 2. Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie metodą „pull-out”
Table 2. The results of the concrete compressive strength measurements using the „pull-out”

Oznaczenie punktu pomiarowego	Bezpośredni odczyt siły wyrrywającej [kN]	Rzeczywista siła wyrrywająca [kN]	Wytrzymałość kostkowa [MPa]
C-1	30,0	29,7	38,8
C-2	33,9	33,6	44,8
C-4	31,4	31,1	41,0
C-7	36,3	36,0	48,5
C-8	32,5	32,3	42,8
C-10	29,7	29,5	38,5

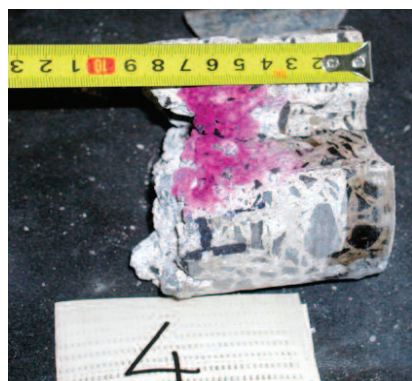
Analiza uzyskanych wyników badań przeprowadzonych metodą „pull-out” wykazała niespodziewanie duże wartości wytrzymałości betonu na ściskanie, znacznie większe od uzyskanych w wyniku badania odwiertów rdzeniowych. Różnica ta wynosi ponad 50%, co jest zastanawiające, ponieważ dotychczasowo

we doświadczenia [7] świadczyły jednoznacznie o bardzo dużej zbieżności wyników badania wytrzymałości metodą CAPO-Test z wynikami uzyskiwanymi w czasie badań laboratoryjnych odwiertów rdzeniowych, które zwykle są uważane za punkt odniesienia w przypadku oceny jakości badanego betonu. Stwierdzone różnice są, w przypadku betonów historycznych, które uległy w znacznym stopniu procesowi karbonatyzacji warstwy przypowierzchniowej, prawdopodobnie spowodowane faktem, iż pomiary metodą „pull-out” wykonuje się w takim przypadku w głęboko skarbonatyzowanej warstwie betonu, której rzeczywista wytrzymałość istotnie się różni od wytrzymałości środkowej warstwy betonu konstrukcyjnego.

Wyniki badania zasięgu procesu karbonatyzacji przekroju betonowego

Oceny zasięgu procesu karbonatyzacji przypowierzchniowej warstwy betonu dokonano za pomocą testu fenofaleinowego (*Deep Purple Test*). Badania przeprowadzono na świeżych przełomach betonowych, powstałych po zniszczeniu badanych próbek w maszynie wytrzymałościowej. Szczegółowe wyniki, uzyskane w poszczególnych miejscach pomiarowych:

- odwiert **O-1/B** – grubość warstwy skarbonatyzowanej ok. 35 mm;
- odwiert **O-2** – grubość warstwy skarbonatyzowanej ok. 22 mm;
- odwiert **O-4** – grubość warstwy skarbonatyzowanej ok. 42 mm (fotografia 2);



Fot. 2. Odwiert O-4 – głębokość karbonatyzacji ok. 42 mm
Photo 2. Core O-4 – carbonation depth approximately 42 mm

- odwiert **O-7** – grubość warstwy skarbonatyzowanej ok. 40 mm;
- odwiert **O-8** – grubość warstwy skarbonatyzowanej ok. 39 mm;
- odwiert **O-10** – grubość warstwy skarbonatyzowanej ok. 37 mm.

Przeprowadzone badania wykazały, że grubości przypowierzchniowej warstwy betonu, która uległa procesowi karbonatyzacji w badanych próbkach, jest dość znaczna i wynosi średnio ok. 36 mm.

Wyniki badania nasiąkliwości betonu

Zbadano pięć próbek wyciętych z odwiertów rdzeniowych, pobranych z pierścienia górnego kopuły. Pomiary wykonano zgodnie z procedurami zawartymi w [9]. Szczegółowe wyniki oznaczenia nasiąkliwości badanego betonu zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie wyników oznaczenia nasiąkliwości betonu

Table 3. The results of concrete absorption measurements

Oznaczenie próbki	Masa próbki nasyconej [g]	Masa próbki w stanie suchym [g]	Nasiąkliwość [%]
Próbka O-1/A	1594,8	1513,0	5,41
Próbka O-3	1355,0	1299,8	4,25
Próbka O-5	1236,0	1174,8	5,21
Próbka O-6	1332,8	1268,2	5,09
Próbka O-9	1755,8	1670,4	5,11

Analizując wyniki badań, stwierdzono, że uzyskane wartości nasiąkliwości są relatywnie niskie, gdyż wynoszą 4,25 – 5,41%, przy współczynniku zmienności równym 8,9%, co świadczy o dużej jednorodności tej cechy. Średnia wartość nasiąkliwości badanego betonu wynosi ok. 5,0% i jest równa wartości powszechnie przyjmowanej za dopuszczalną (5%) [9].

Podsumowanie

Uzyskane wyniki badania jakości betonu w górnym pierścieniu kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu świadczą o wyjątkowo dobrej jego jakości. Parametry wytrzymałościowe odpowiadają bowiem obecnym wymaganiom stawianym klasie wytrzymałości C20/25. Bardzo dobrą jakość badanego betonu potwierdziły także wyniki oznaczenia nasiąkliwości, której wartość wynosi średnio ok. 5%. Biorąc pod uwagę poziom

technologii betonu na początku ubiegłego wieku, należy uznać ten wynik za nadspodziewanie dobry. Jednocześnie stwierdzono znaczne zaawansowanie procesu karbonatyzacji przypowierzchniowej warstwy betonu. Głębokość karbonatyzacji wynosi średnio ok. 36 mm. Fakt ten jest prawdopodobnie jedną z głównych przyczyn różnej wartości wytrzymałości betonu na ściskanie uzyskanej w wyniku badania odwiertów rdzeniowych i metodą CAPO-Test. Zaobserwowane zjawisko jest najprawdopodobniej spowodowane zaawansowanym wiekiem badanego betonu (ponad 100 lat) i związanymi z tym istotnymi zmianami zachodzącymi w strukturze jego warstwy przypowierzchniowej oraz procesem jej karbonatyzacji. Zagadnienie to wymaga dalszych prac badawczych, ze szczególnym uwzględnieniem betonów historycznych, w przypadku których możliwość wiarygodnego stosowania nowoczesnych nieniszczących metod diagnostycznych ma niezwykle istotne znaczenie.

Literatura

- [1] Ilkosz J. Centennial Hall and an exhibition area – Max Berg’s master piece. 2015. National Museum in Wrocław.
- [2] Onysyk J, Biliszczuk J, Prabucki P, Sadowski K, Toczkiwicz R. Strengthening the 100-year-old reinforced concrete dome of the Centennial Hall in Wrocław. *Structural Concrete*. 2014; 1: 30 – 37.
- [3] Jasięńko J, Moczko A, Moczko M, Dżugaj R. Badanie cech mechanicznych i fizycznych betonu w pierścieniu obwodowym kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu. *Wiadomości Konserwatorskie*. 2010; 27: 21 – 34.
- [4] Jasięńko J, Moczko A, Moczko M, Wała D. 2011. „Beton Hali Stulecia (UNESCO List) we Wrocławiu”. *Wiadomości Konserwatorskie*. 2011; 30: 168 – 177.
- [5] Jasięńko J, Moczko A, Moczko M. Badania cech betonu w konstrukcji wsporczej kopuły Hali Stulecia we Wrocławiu. *Materiały Budowlane*. 2015; 11: 1 – 2.
- [6] PN-EN 12504-1:2019 Badania betonu w konstrukcjach – Część 1: Odwierty rdzeniowe – wycinanie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie.
- [7] Moczko AT, Carino NJ, Petersen CG. CAPO-Test to estimate concrete strength in bridges. *ACI Materials Journal*. 2016; vol. 113, Nr 6: 827 – 836.
- [8] PN-EN 12390-3:2019 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.
- [9] PN-88/B-06250 Beton Zwykły. 1988.

Przyjęto do druku: 04.10.2022 r.