

Szacowanie wieku betonu na podstawie pomiaru głębokości karbonatyzacji

PIOTR WOYCIECHOWSKI*, GRZEGORZ ADAMCZEWSKI

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Zakład Inżynierii Materiałów Budowlanych

Streszczenie: Artykuł dotyczy problematyki związanej z określaniem wieku betonu w który ma decydujące znaczenie np. przy rozstrzygnięciu spraw spornych związanych z własnością. W sytuacji kiedy brak jest informacji dotyczących przebiegu budowy jednym z możliwych sposobów określenia wieku betonu w konstrukcji może okazać się oszacowanie go na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, w szczególności głębokości karbonatyzacji betonu. W artykule podano metodykę takiego właśnie sposobu szacowania wieku betonu na podstawie badań własnych i doświadczenia autorów.

Słowa kluczowe: karbonatyzacja betonu, badania betonu in situ, wskaźniki alkacymetryczne, ocena wieku betonu

1. Geneza tematu

W eksperckiej działalności Autorów kilkakrotnie wystąpił problem sporu pomiędzy stronami postępowania prawnego, w którym kluczowe znaczenie formalne miało określenie wieku użytkowanego betonowego elementu obiektu budowlanego. Oczywiście podstawowym źródłem wiedzy w tym zakresie powinna być dokumentacja obiektu, z której wynika czas trwania budowy, a zatem pośrednio – wiek betonu. Często jednak – w przypadku niewielkich elementów, zwłaszcza wykonywanych metodami gospodarczymi, dokumentacja taka nie jest dostępna. Z punktu widzenia technicznych problemów inżynierskich, określenie wieku betonu zwykle nie jest istotne, stąd metody diagnostyczne skupione są na określaniu rozmaitych właściwości mechanicznych, chemicznych, związanych z trwałością itp.

W postępowaniach spornych dotyczących m. in. prawa własności nieruchomości, określenie, kiedy dany element faktycznie został wykonany może mieć istotne znaczenie. Przykładowo, autorzy artykułu kilkakrotnie proszeni byli o rozstrzygnięcie sporu o wiek betonowych elementów ogrodzeń nieruchomości na sąsiadujących działkach. Określenie daty wzniesienia takiego elementu miało decydujące znaczenie w kontekście zasądzenia tzw. zasiedzenia nieruchomości.

Zasiedzenie nieruchomości jest sposobem nabycia jej prawa własności przez nieuprawnionego posiadacza wskutek faktycznego wykonywania tego prawa w ciągu oznaczonego w ustawie czasu. Według Kodeksu Cywilnego [1], aby można było zasiedzieć nieruchomość muszą być spełnione następujące przesłanki:

– posiadanie samoistne,

*Autor do korespondencji: p.woyciechowski@il.pw.edu.pl

- ciągłość posiadania,
- upływ okresu czasu.

Posiadanie faktyczne nieruchomości przez nieuprawnionego posiadacza może być w postępowaniach rozstrzygających dokumentowane na różne sposoby, w tym bardzo często, wobec braku dokumentów, w oparciu o zeznania świadków ale także obiektywne przesłanki związane ze sposobem zagospodarowania i użytkowania nieruchomości. Taką przesłanką może być np. fakt istnienia obiektów budowlanych integrujących nieruchomość posiadaną w sposób uprawniony z nieruchomością będącą przedmiotem postępowania o zasiedzenie – na przykład elementów wspólnego ogrodzenia.

Decydujące wobec orzeczenia zasiedzenia jest w takim przypadku stwierdzenie długości okresu nieuprawnionego posiadania. Minimalny okres wynosi:

- nieprzerwanie 20 lat w przypadku posiadania samoistnego w dobrej wierze,
- nieprzerwanie 30 lat w przypadku posiadania w złej wierze.

Tak więc, ustalenie czy element ma więcej czy mniej niż 20 lub 30 lat, może – w przypadku braku innych dowodów – stanowić względnie obiektywną podstawę końcowej decyzji o zasiedzeniu nieruchomości.

Zdaniem autorów niniejszego artykułu – jeśli taki element jest wykonany z betonu nieosłoniętego powierzchniowo innymi materiałami – wtedy takiemu zgrubnemu oszacowaniu wieku elementu może służyć pomiar głębokości karbonatyzacji betonu.

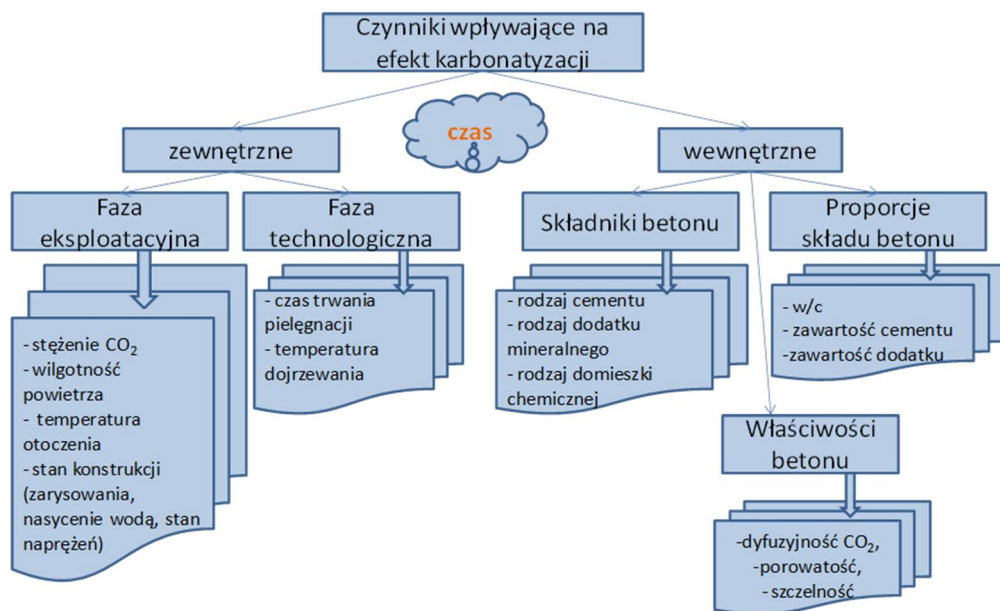
Przedmiotem artykułu jest przedstawienie sposobu postępowania umożliwiającego oszacowanie wieku betonu na podstawie pomiaru głębokości karbonatyzacji betonu in situ wraz z oceną innych niezbędnych charakterystyk tego betonu. Rozważono możliwą do osiągnięcia dokładność oszacowania i jej adekwatność do założonego celu. Przedstawiono przykłady oszacowań z eksperckiej praktyki autorów.

2. Przebieg karbonatyzacji betonu w czasie – pomiary, modele, prognozowanie

Karbonatyzacja betonu uwarunkowana jest dostępem do jego powierzchni dwutlenku węgla, natomiast jej intensywność, szybkość i postęp zasięgu w głąb betonu w czasie silnie zależą od szeregu czynników, które można sklasyfikować jako zewnętrzne, tzn. związane z warunkami otoczenia i wewnętrzne, tzn. związane ze składem i strukturą betonu (rys. 1).

Wśród czynników zewnętrznych wyróżnia się czynniki kształtujące warunki eksploatacji betonu oraz czynniki technologiczne, decydujące o właściwościach betonu w czasie jego wykonywania.

Czynniki wewnętrzne wpływające na przebieg karbonatyzacji to właściwości składników betonu, ich proporcje w betonie oraz – pośrednio – właściwości stwardniałego betonu, wynikające zarówno z doboru jakościowo ilościowego betonu, jak i z uwarunkowań wykonawczych elementu badanego. Proponowany podział jest nieostry ponieważ poszczególne czynniki są ze sobą silnie powiązane (np. w/c – porowatość – zarysowanie-dyfuzyjność itp.). Podział ten wskazuje czynniki, które powinny być brane pod uwagę przy ustalaniu przebiegu karbonatyzacji w betonie, w tym w diagnostyce i prognozowaniu trwałości oraz przy szacowaniu wieku betonu według koncepcji przedstawianej w niniejszym artykule.



Rys. 1. Czynniki decydujące o przebiegu karbonatyzacji [2].

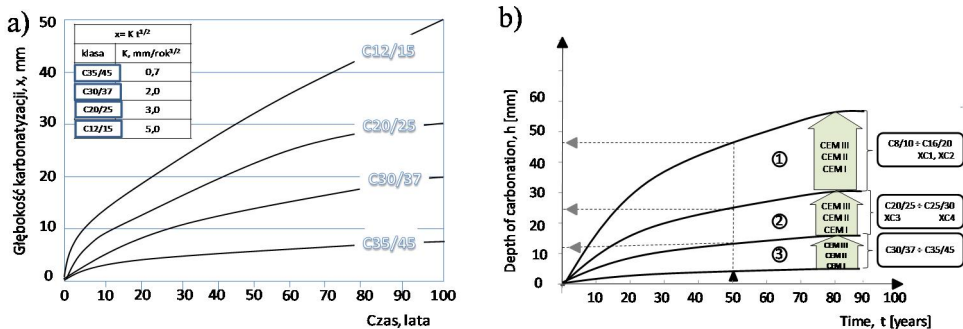
Istotą tej ostatniej koncepcji jest powiązanie modelem matematycznym wieku betonu i głębokości karbonatyzacji. Badania nad opracowaniem uniwersalnych modeli karbonatyzacji, opisujących jej zmiany w czasie i uwzględniających różne zmienne materiałowe i technologiczne są prowadzone od wielu lat w różnych ośrodkach naukowych. Podstawową charakterystyką mikrostruktury betonu, która decyduje o szybkości procesu jest współczynnik dyfuzji CO₂ w betonie, który – wychodząc od praw Ficka – prowadzi do ustalenia modelu karbonatyzacji w postaci:

$$x = \sqrt{\frac{2D\varphi_{zewn}}{a}} \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

gdzie: x jest głębokością karbonatyzacji, D – współczynnikiem dyfuzji CO₂ w betonie, φ_{zewn} – stężeniem CO₂ w środowisku, t – czasem ekspozycji, a – współczynnikiem określającym ilość CO₂ wiązanego na drodze karbonatyzacji przez jednostkę objętości betonu w kg/m³. Taka postać modelu oparta o teorię dyfuzji jest przytaczana w literaturze w wielu uproszczonych, modyfikowanych empirycznie postaciach, a przegląd takich modeli przedstawiono w kilku publikacjach współautorskich Autora, m.in. [3, 4, 5, 6].

W wielu publikacjach przedstawiane są także modele empiryczne karbonatyzacji wyznaczone metodami curve fitting na podstawie wyników badań w ograniczonym zakresie zmiennych materiałowych i warunków ekspozycji. Zwykle są to zależności, w których głębokość karbonatyzacji jest funkcją czasu i zmiennych takich jak w/c, czas wilgotnościowej pielęgnacji i charakterystyka spoiwa. Spotykane są także w literaturze modele w postaci orientacyjnych nomogramów, pozwalających wyznaczyć prognozowaną głębokość karbonatyzacji na podstawie znajomości wybranych charakterystyk materiałowych i środowiskowych, takie jak np. nomogram przytoczony w [7].

W wielu opracowaniach publikowane są także modele opisujące orientacyjny przebieg karbonatyzacji z upływem czasu t jako odwrotnie proporcjonalny do wytrzymałości betonu na ściskanie, przy czym najczęściej są to modele stanowiące paraboliczne lub hiperboliczne funkcje czasu, przedstawiane bądź w postaci funkcji (rys. 2a) bądź graficznych nomogramów służących do wyznaczania prognozowanej głębokości karbonatyzacji po określonym czasie ekspozycji (tj. użytkowania) betonu (rys. 2b).



Rys. 2. Głębokość karbonatyzacji betonu w czasie z uwzględnieniem klasy wytrzymałości betonu – a) nomogram dla betonów z cementem portlandzkim wg [7] – K – współczynnik szybkości karbonatyzacji; b) – nomogram uwzględniający rodzaj cementu wg [8].

Charakter takich nomogramów z założenia jest orientacyjny i w zamierzeniu mają one służyć przede wszystkim weryfikacji doboru grubości betonowej otuliny zbrojenia lub prognozom trwałościowym, tzn. określeniu czasu w latach, po którym cała grubość otuliny będzie skarbonatyzowana, tj. czasu potencjalnej inicjacji korozji zbrojenia.

Zamysłem Autorów jest wykorzystanie tego rodzaju zależności jak na rys. 2a lub nomogramów jak na rys 2b w sposób odwrotny od zamierzonego: znając klasę betonu i rodzaj cementu oraz rzeczywistą – pomierzoną w konstrukcji – głębokość karbonatyzacji, można z nomogramu odczytać orientacyjny wiek betonu. Niepewność takiego oszacowania wynika z bardzo przybliżonego i uogólnionego charakteru zależności, które są dostępne w źródłach literaturowych. Wyznaczenie empirycznego modelu dla betonu konkretnej wieloletniej konstrukcji, stanowiącej przedmiot analizy, nie jest możliwe w toku diagnostyki. Istotne elementy niepewności oszacowania mogą wynikać także między innymi z wyboru miejsca wykonania badania karbonatyzacji w konstrukcji (z uwzględnieniem warunków ekspozycji), przyjętego sposobu oceny klasy wytrzymałości betonu, sposobu identyfikacji rodzaju spoiwa w betonie. W kolejnym punkcie opracowania przedstawiono ogólne wytyczne postępowania, które Autorzy proponują w oparciu o własne praktyczne doświadczenie.

3. Propozycja metodyki szacowania wieku betonu na podstawie pomiaru głębokości karbonatyzacji

Założeniem wstępnym badania jest brak jakiegokolwiek wiedzy o betonie analizowanej konstrukcji.

Zakres badań

Konieczny do oszacowania zakres badań obejmuje:

- szacunkowe ustalenie klasy wytrzymałości betonu – np. na podstawie odwiertów lub inną metodą,

- ustalenie prawdopodobnego rodzaju cementu w betonie – wizualnie lub zaawansowanymi metodami instrumentalnymi,
- wybór miejsc badania głębokości karbonatyzacji z uwzględnieniem warunków ekspozycji powierzchni konstrukcji w czasie eksploatacji,
- badanie głębokości karbonatyzacji na świeżych odkuwkach in situ lub przełamach próbek pobranych z konstrukcji – metodą chemiczną z wykorzystaniem wskaźników alkacymetrycznych.

Metody i przebieg badań

Najlepszą metodą oszacowania klasy wytrzymałości betonu, dla którego nie jest dostępna żadna dokumentacja techniczna, jest pobranie odwiertów z konstrukcji. Sposób postępowania jest w tym przypadku regulowany zapisami normy PN-EN 13791:2019-12, a szczegóły praktycznego jej stosowania omówiono dokładnie m.in. w publikacji G. Bajorka i M. Gruszczyńskiego [9].

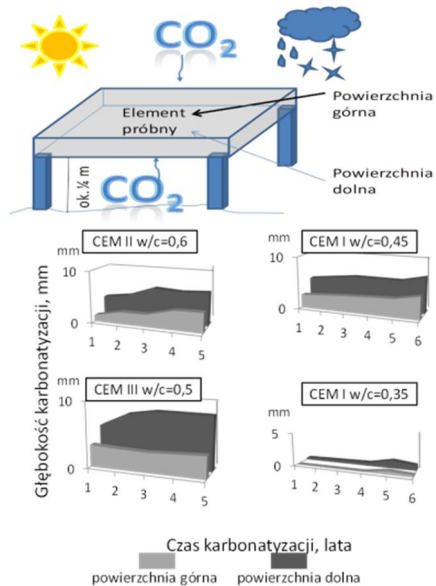
Ustalenie rodzaju cementu (spoiwa) w betonie ma znaczenie w kontekście korzystania z nomogramów do szacowania głębokości karbonatyzacji, które mogą uwzględniać fakt, że postęp karbonatyzacji jest szybszy w przypadku betonów o znacznym udziale nieklinkierowych składników spoiwa. Przykład nomogramu wskazany na rysunku 2b uwzględnia wpływ rodzaju cementu (CEMI, CEM II, CEM III) na postęp karbonatyzacji betonu. Zaawansowane badania instrumentalne, umożliwiające stwierdzenie obecności w betonie składników nieklinkierowych cementu, są dość kosztowne i nie w pełni uzasadnione w omawianej sytuacji, aczkolwiek możliwe do wykonania. Do zgrubnego oszacowania można także wykorzystać makro- i mikroskopowe obserwacje, w tym związane z odcieniem kolorystycznym betonu. Znacząca zawartość popiołów lotnych sprawia, że odcień betonu staje się ciemnoszary, podczas gdy duży udział żużła lub mączki wapiennej rozjaśnia odcień betonu – wprawne oko eksperta jest często dostatecznym narzędziem takiego rozróżnienia.

Pomiar głębokości karbonatyzacji betonu wykonuje się najczęściej z wykorzystaniem fenoloftaleiny, której bezbarwny roztwór, przy granicznym pH=8,3 zmienia zabarwienie na fioletowe. Procedura pomiaru podana jest w normie PN-EN 14630:2007. Istotnym elementem oszacowania jest odpowiedni wybór miejsc pomiarowych, przy czym należy zachować następujące zasady:

- w miejscu wykonywania pomiaru beton w okresie eksploatacji nie był pokryty innym materiałem utrudniającym dostęp dwutlenku węgla do powierzchni (np. powłoką malarską, tynkiem itp.);
- badana powierzchnia betonu nie była stale lub okresowo zanurzona w wodzie,
- badana powierzchnia betonu nie była przykryta gruntem,
- pomiar wykonuje się na świeżo odkutej (bezppośrednio przed badaniem) powierzchni betonu,
- nie jest dopuszczalne wykonanie pomiaru na poboczniczy odwiertu pobranego z konstrukcji,
- dopuszczalne jest wykonanie pomiaru na przełamie świeżo rozłupanego odwiertu, w krótkim czasie po jego pobraniu,
- pomiar głębokości karbonatyzacji należy powtórzyć w kilku wybranych miejscach elementu i do celu oszacowania wieku posługiwać się wartością średnią – nie należy wybierać miejsc gdzie beton jest uszkodzony, zarysowany, spękany itp.

W kontekście wyboru miejsca pomiarowego warto zauważyć, że – oprócz braku uszkodzeń powierzchniowych betonu, istotne znaczenie dla przebiegu karbonatyzacji ma to czy dana powierzchnia podlega częstym zmianom wilgotności i temperatury (np. płyta elewacyjna) czy też nie (np. dolna powierzchnia estakady). Powierzchnie o stałym średnim stopniu zwilgocenia

ulegają karbonatyzacji szybciej (rys. 3) i – zdaniem Autorów – stanowią właściwy wybór miejsca pomiarowego przy szacowaniu wieku betonu.

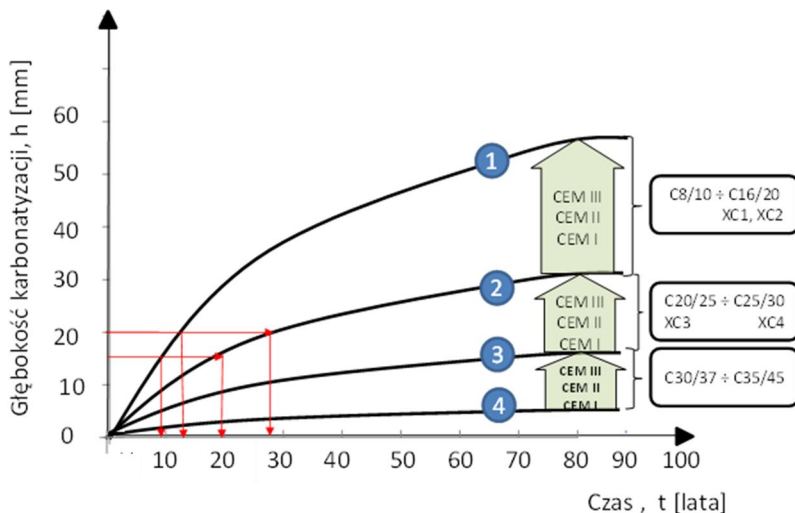


Rys. 3. Wpływ warunków ekspozycji na postęp karbonatyzacji betonu (badania własne).

Zasada szacowania wieku betonu

Uzyskane zgodnie z procedurą opisaną powyżej informacje o klasie wytrzymałości, rodzaju użytego cementu i średniej głębokości karbonatyzacji pozwalają skorzystać z nomogramu 2b lub zależności na rys 2a.

W przypadku korzystania z nomogramu postępuje się w sposób pokazany czerwonymi strzałkami na rys. 4.



Rys. 4. Sposób szacowania wieku betonu na podstawie pomiaru głębokości karbonatyzacji (opis w tekście).

Na rysunku przedstawiono możliwe warianty oszacowania wieku betonu dla zmierzonej głębokości karbonatyzacji wynoszącej 15–20 mm. I tak, na podstawie nomogramu można stwierdzić, że głębokość karbonatyzacji 15–20 mm betonu niskiej wytrzymałości – tj. klas od C8/10 do C16/20 (obszar między krzywymi 1 i 2 na rys. 4) odpowiada okresowi eksploatacji od około 10 do maksymalnie ok. 27 lat. Niższa z tych wartości odpowiada klasie C8/10 i cementowi hutniczemu (CEM III), wyższa – klasie C16/20 i cementowi portlandzkiemu (CEM I).

Skorzystanie z zależności $x = K \times t^{1/2}$ (wg [2]), w celu wyznaczenia wieku betonu wymaga przekształcenia tej formuły do postaci $t = (x/K)^2$, gdzie x – głębokość karbonatyzacji, K – współczynnik szybkości karbonatyzacji. Współczynniki takie są dostępne w literaturze przede wszystkim dla betonów z cementem portlandzkim. W przypadku innych cementów ten wariant jest mało realny do wykorzystania

Ograniczenia i niepewność stosowania metody

Autorzy pomysłu z całą stanowczością podkreślają, że przedstawiane narzędzie może mieć jedynie charakter pomocniczy w aspekcie prawnym – nie technicznym czy naukowo-badawczym, a uzyskiwane wyniki powinny być traktowane jako obciążone istotnym błędem.

Zdaniem autorów metoda może służyć do szacowania czy beton przekroczył określony wiek czy też nie, a nie do określania faktycznego wieku betonu. Jak jednak wskazano na początku artykułu – często celem działań prawnych jest określenie czy wiek betonu przekracza czy nie granice 20–30 lat. Praktyka stosowania metody wskazuje, że można ją wykorzystać przede wszystkim do wykazania, iż beton jest młodszy niż wskazują to ustne informacje. Mała głębokość karbonatyzacji betonu o niskiej lub przeciętnej wytrzymałości wskazuje jednoznacznie, że jest to beton relatywnie „młody” – proponowany schemat postępowania pozwala z dużym prawdopodobieństwem, zamienić takie domniemanie w popartą doświadczalnie wartość liczbową. W sytuacji, kiedy przedmiotem badań jest beton w wieku dziesiątek lat, wynik szacowania obciążony jest tak dużym błędem, że trudno traktować oszacowanie jako użyteczne.

4. Przykład

Przedmiotem sprawy, w której autorzy wykorzystali proponowany schemat postępowania był spór sąsiedzki o pas działki w granicy między posesjami. Posesje rozdzielone były ogrodzeniem z siatki stalowej ze słupkami na wysokiej betonowej podmurówce (rys. 5). Ogrodzenie to postawiono nie w faktycznej granicy działek gruntowych wynikającej z map hipotecznych, tylko mniej więcej równoległe w przesunięciu o ok. 4 metry w stosunku do tych granic. Biorąc pod uwagę fakt długości spornego ogrodzenia wynoszącej ponad 50 m.b., można łatwo wyliczyć, że przedmiotem sporu było ponad 200 m² działki budowlanej, czyli przedmiot znacznej wartości materialnej. Jedna ze stron sprawy – ubiegająca się o stwierdzenie zasiedzenia – twierdziła, że podmurówka została wykonana na przełomie lat 60-tych i 70-tych XX wieku, podczas gdy druga strona przekonywała, że budowa ogrodzenia miała miejsce w latach 90-tych, a więc w chwili biegu sprawy nie miała jeszcze 20 lat. Jak to często bywa w takich sąsiedzki sporach – dokumentacja techniczna i formalna budowy ogrodzenia metodą gospodarczą – nie istniała, zaś świadkowie powołani przez strony powodową i pozwaną zeznawali w sposób wzajemnie sprzeczny. Autorzy artykułu podjęli się oszacowania wieku betonu na podstawie pomiaru karbonatyzacji.

Podmurówka była w dobrym stanie wizualnym. Wytypowano na niej miejsca do pobrania próbek oraz do wykonania odwiertów do oszacowania klasy wytrzymałości betonu. W jednym

z miejsc wytypowanych do wykonania odwiertu stwierdzono występowanie dużych fragmentów kamieni (rys. 6), zastosowanych jako wypełniacz w betonie wykonywanym metodą gospodarczą – w tym miejscu wykonanie odwiertów nie było możliwe i zostało wykonane w innym miejscu o zadowalającej jednorodności betonu.



Rys. 5. Przygotowanie podmurówki do pobrania próbek oraz wykonania odkuwek.



Rys. 6. Pobieranie próbek z podmurówki, widoczne fragmenty dużych kamieni w betonie zastosowanych jako wypełnienie.

Odkuwki do pomiaru głębokości karbonatyzacji wykonywano na górnej krawędzi podmurówki, a następnie – weryfikacyjnie, na przełamie odwiertów po badaniu wytrzymałości na ściskanie. W toku badań uzyskano następujące wyniki:

- wytrzymałości na odwiertach o średnicy 75 mm wynosiły od 17 do 20 MPa, co pozwoliło oszacować klasę betonu, jako dawne B15 (czyli obecne C12/15),
- głębokość karbonatyzacji we wszystkich punktach pomiarowych mieściła się w przedziale 15–20 mm (rys. 7),
- analizując wygląd betonu przyjęto, że najbardziej prawdopodobne było wykonanie betonu z cementem portlandzkim; uznano także, że jeśli teza o pochodzeniu betonu z lat 60-tych miałaby być prawdziwa – użycie cementu portlandzkiego byłoby prawie pewne, biorąc pod uwagę ówczesną strukturę rynku cementu dostępnego dla indywidualnych inwestorów.



Rys. 7. Pomiar głębokości karbonatyzacji na odkuwce i fragmencie odwiertu.

Korzystając z zasad omówionych wcześniej, posilując się nomogramami i zależnościami z rys 4 ustalono co następuje:

- zakładając, że klasę betonu oszacowano na C12/15, najbardziej prawdopodobne było użycie jako spoiwa cementu portlandzkiego, a głębokość karbonatyzacji wyniosła 15–20 mm, wiek badanego betonu – według pierwszego wariantu oszacowania – nie mógł przekraczać 27 lat,
- korzystając z równania $x = K \times t^{1/2}$ i oszacowanych wcześniej charakterystyk badanego betonu, można obliczyć: dla maksymalnej głębokości karbonatyzacji $x = 20$ mm, wytrzymałości betonu 20 MPa i wskaźnika $K = 4,0$ mm/rok^{1/2}, otrzymujemy: $20 = 4,0 \times t^{1/2}$, skąd szacunkowy wiek betonu $t = (20/4)^2 = 25$ lat, natomiast dla minimalnej głębokości karbonatyzacji $x = 15$ mm, wytrzymałości betonu 20 MPa i wskaźnika $K = 4,0$ mm/rok^{1/2}, otrzymujemy: $15 = 4,0 \times t^{1/2}$, skąd szacunkowy wiek betonu $t = (15/4)^2 = 14$ lat. Obliczenie to pozwala wnioskować – według drugiego wariantu rozumowania – że wiek badanego betonu nie mógł przekraczać 25 lat.

Żaden z przyjętych scenariuszy nie zbliżył szacowanego wieku betonu do 40–50 lat, jak wynikało to z wniosku strony powodowej.

Opinia autorów artykułu przesądziła o sposobie rozstrzygnięcia sprawy w postępowaniu sądowym.

5. Podsumowanie

Przedstawiona w artykule koncepcja przez samych Autorów jest traktowana z dużym dystansem oraz świadomością jej niedoskonałości, ograniczeń i dużej niedokładności oszacowania. Trudno jednak podważyć istnienie ścisłego związku pomiędzy faktycznym zasięgiem karbonatyzacji w betonie i jego wiekiem. Tak więc – przy wszystkich wadach metody i wobec braku innej możliwości określenia wieku betonu – Autorzy widzą pewien potencjał stosowania proponowanego schematu postępowania.

Z naukowej rzetelności należy także wspomnieć, że metoda oparta jest o modele nieskończone karbonatyzacji – ponieważ takie istnieją dostępne w literaturze wskaźniki i nomogramy. Stoi to niejako w sprzeczności (pozornej) z wielokrotnie publikowaną przez Autorów teorią skończonej (ograniczonej) karbonatyzacji, według której jest ona funkcją hiperboliczną czasu, a więc ma skończony zasięg w betonie (asymptota modelu), osiągnięty

jednak w nieskończonym czasie. Pozorność tej sprzeczności wynika z faktu prowadzenia analiz w ograniczonym zakresie czasowym (tj. 20–40 lat), w którym to okresie – w warunkach naturalnej karbonatyzacji – modele hiperboliczny i paraboliczny nie są rozbieżne na tyle, aby istotnie wpływało to na wynik szacowania wieku betonu.

Literatura

1. Ustawa z dnia 23 kwietnia 1964 r. – Kodeks cywilny, Dz.U. 1964 nr 16 poz. 93.
2. Woyciechowski P.: Model karbonatyzacji betonu, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Budownictwo, nr 157, 2013, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 178 s., ISBN 978-83-7814-103-7.
3. Czarnecki L., Woyciechowski P., Adamczewski G.: Risk of concrete carbonation with mineral industrial by-products, KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, vol. 22, nr 2, s. 755–764. DOI:10.1007/s12205-017-1623-5.
4. Czarnecki L., Woyciechowski P.: Concrete Carbonation as a Limited Process and its Relevance to Concrete Cover Thickness, ACI Materials Journal, 2012, vol. 109, nr 3, s. 275–282.
5. Czarnecki L., Woyciechowski P.: Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space?, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, 2015, vol. 63, nr 1, s. 43–54. DOI:10.1515/bpasts-2015-0006.
6. Woyciechowski P., Dominika S., Kuziak J., [i in.]: Experimental verification of carbonation models used for estimation of reinforced concrete structures durability, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, 2020, vol. 68, nr 5, s. 1159–1166. DOI:10.24425/bpasts.2020.134652.
7. Czarnecki L., Emmons P.: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków 2002.
8. Czarnecki L., Woyciechowski P.: Durability of concrete according to the European standard EN 206, ICDC 2012, International Congress on Durability of Concrete 18–21 June 2012, Trondheim, Norway, Norwegian Concrete Association.
9. Bajorek G., Gruszczyński M.: Nowe podejście do oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji istniejącej wg PN-EN 13791:2019-12, BTA kwiecień – czerwiec 2020, str. 62–67.

Estimating the age of concrete on the basis of carbonation depth measurement

Key words: concrete carbonation, in situ concrete testing, acid-base indicators, concrete age assessment