

Jedną z charakterystycznych cech współczesnego polskiego budownictwa jest niewątpliwie stale rosnące zainteresowanie konstrukcjami betonowymi, wznoszonymi w technologiach monolitycznych. Dynamiczny rozwój tego sektora obserwuje się w szczególności w dwóch obszarach. W dziedzinie systemów deskowań oraz technologii betonu towarowego.

W zakresie deskowań, dzięki wejściu na nasz rynek szeregu renomowanych firm, takich jak chociażby DOKA, Hunnebeck, Noe, czy PERI, aktualne możliwości wykonawcze polskich firm budowlanych nie odbiegają od potencjału ich zagranicznych konkurentów i pozwalają na szybkie zrealizowanie obiektu o praktycznie dowolnym kształcie. Widocznemu postępowi w tej dziedzinie towarzyszy także stały rozwój technologii samego betonu. Choć nazwa nie uległa zmianie, to jednak dzisiejszy beton to już nie jest ten sam beton, co jeszcze kilkanaście lat temu. Współczesny beton towarowy nasycony jest zaawansowaną chemią, zawiera szereg dodatków i domieszek, które w istotny sposób modyfikują jego właściwości, w zależności od wymagań klienta.

Równocześnie inżynier budowlany, kierujący robotami betonowymi, coraz częściej zmuszony jest do podejmowania bezpośrednio na obiekcie („in-situ”) szybkich decyzji, które z jednej strony muszą gwarantować bezpieczeństwo i spełnienie stawianych wymagań technicznych, ale zarazem prowadzić do znalezienia rozwiązania danego problemu w sposób optymalny ekonomicznie. Z tego typu sytuacjami mamy do czynienia między innymi w przypadku konieczności znalezienia odpowiedzi na następujące pytania.

- Jaki jest optymalny termin rozdeskowania zabetonowanej części konstrukcji, umożliwiającą, przy zachowaniu niezbędnego poziomu bezpieczeństwa, ponowne, efektywne wykorzystanie posiadanych lub wynajmowanych deskowań i podpór?
- Jaki jest rzeczywisty przyrost wytrzymałości betonu w obiekcie, realizowanym w niekorzystnych warunkach pogodowych, np. w niskich temperaturach?
- Czy aktualna wytrzymałość na ściskanie wbudowanego betonu pozwala na bezpieczne przekazanie sił sprężających?
- Czy aktualne parametry mechaniczne

Nowoczesne metody nieniszczącej kontroli wytrzymałości dojrzewającego betonu

wbudowanego betonu pozwalają na bezpieczne kontynuowanie robót betonowych, ze szczególnym uwzględnieniem realizacji obiektów o dużych wysokościach?

- Czy rzeczywiste parametry jakościowe wbudowanego betonu odpowiadają wymaganiom projektu oraz warunkom zamówienia?

Właściwe rozwiązanie zasygnalizowanych powyżej problemów wymaga z jednej strony dostępu do nowoczesnych narzędzi diagnostycznych, z drugiej zaś coraz wyższych kwalifikacji zarówno kadry inżynierskiej, jak i pracowników bezpośrednio wykonujących poszczególne roboty. Można w tym miejscu zacytować słowa profesora Adama Neville'a, wygłoszone w czasie konferencji „Beton na progu nowego milenium”, zorganizowanej w listopadzie 2000 roku w Krakowie z okazji obchodów 10-lecia Stowarzyszenia Producentów Cementu i Wapna: „Otóż beton jest materiałem znakomitym, ale suma różnych działań towarzyszących jest niewystarczająca. Panuje ogólne przekonanie, że beton może układać każdy głupiec”.

Niestety, również w dziedzinie kontroli jakości betonu towarowego, dojrzewającego w konstrukcji, mamy do czynienia z podobną sytuacją. Nadal głównym źródłem informacji o parametrach technicznych wbudowanego betonu są wyniki badania kilku próbek, pobranych w czasie betonowania, chociaż powszechnie wiadomo, iż warunki dojrzewania betonu w próbce o małej objętości, na dodatek przechowywanej w „wyidealizowanych” warunkach laboratoryjnych, daleko odbiegają od rzeczywistego przebiegu procesu wiązania i twardnienia tego tworzywa, jaki zachodzi na miejscu budowy. Wyniki badania tego rodzaju próbek spełniają co prawda formalne wymagania przepisów normowych, ale z praktycznego punktu widzenia są mało użyteczne. Słuszne więc wydaje

się być poszukiwanie innych, bardziej wiarygodnych metod kontroli przebiegu zmian mechanicznych właściwości dojrzewającego betonu. Na uwagę zasługują tu w szczególności dwie metody diagnostyczne:

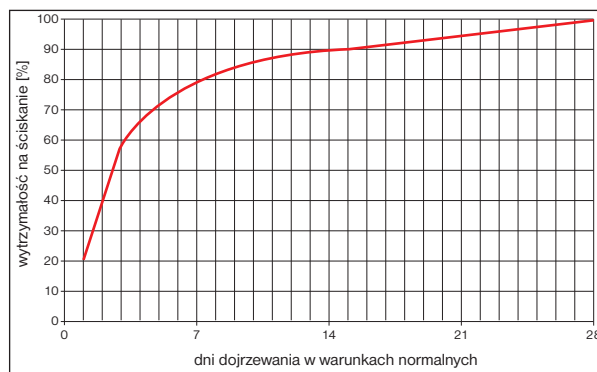
- COMA-Test, metoda pozwalająca na bezpośrednią ocenę stopnia dojrzałości betonu w konstrukcji
- LOK-Test, odmiana metody „pull-out”, umożliwiająca dokonanie wiarygodnej oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w obiektach betonowych, będących w fazie realizacji.

Ocena stopnia dojrzałości betonu za pomocą COMA-Testu

Związek pomiędzy wiekiem betonu i przyrostem jego wytrzymałości na ściskanie wyraża powszechnie znana krzywoliniowa zależność, której przykładowy przebieg przedstawiono na rys. 1.

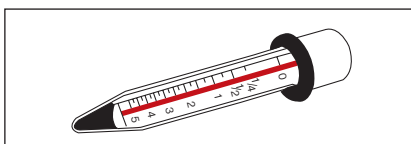
Znajomość przedstawionej powyżej krzywej pozwala w dowolnym momencie przewidzieć wytrzymałość betonu na ściskanie. Jest to więc stosunkowo najprostsza nieniszcząca metoda oceny wytrzymałości betonu. Podstawową barierą, ograniczającą jej szerokie wdrożenie w praktyce inżynierskiej, jest fakt, iż rzeczywiste warunki dojrzewania betonu w istniejącej konstrukcji zasadniczo odbiegają od tak zwanych warunków normowych (laboratoryjnych), dla których zależność ta jest określana.

Poszukiwanie rozwiązania tego problemu stało się przedmiotem zainteresowania szeregu ośrodków naukowych. Wynikiem



Rys. 1. Przykładowy przebieg zależności pomiędzy wytrzymałością betonu na ściskanie a jego wiekiem, licznym w dniach dojrzewania w warunkach normowych

przeprowadzonych prac badawczych było opracowanie metody diagnostycznej, pozwalającej na wyrażenie aktualnego stopnia dojrzałości betonu, wbudowanego w konstrukcję, w postaci liczby dni, po których beton ten, dojrzewając w laboratorium w warunkach normowych, osiągnąłby analogiczną wytrzymałość na ściskanie. Metoda ta, znana powszechnie jako COMA-Test (COncrete MAaturity Test), wykorzystuje związek pomiędzy temperaturą dojrzewającego w konstrukcji betonu, uwarunkowaną między innymi zmienną temperaturą otoczenia i wpływem ciepła hydratacji betonu, a szybkością procesu odparowania specjalnie dobranej cieczy, którą wypełniona jest szklana kapilara, stanowiąca zasadniczą część próbnika (rys. 2).



Rys. 2. Próbnik COMA-Meter

Innymi słowy, istota metody sprowadza się do odniesienia stanu zaawansowania procesu dojrzewania betonu w konkretnych warunkach zewnętrznych do okresu normowego dojrzewania betonu w warunkach laboratoryjnych, przebiegającego w temperaturze +20°C (zgodnie z przepisami obowiązującymi we Wspólnocie Europejskiej). Miarą dojrzałości betonu jest liczba tzw. umownych dni dojrzewania w temperaturze +20°C (M_{20}), odpowiadająca poziomowi przyrostu wytrzymałości betonu na ściskanie w tym okresie. Znajomość, dla danego rodzaju betonu, zależności pomiędzy tak rozumianym stopniem dojrzałości betonu a jego wytrzymałością na ściskanie pozwala w prosty sposób na określenie aktualnej wytrzymałości betonu w konstrukcji. Wyniki uzyskiwane metodą COMA-Test są bardzo zbliżone do wyników otrzymanych z przedstawionego poniżej równania Arrheniusa w szerokim przedziale temperatur, przy czym w temperaturze +20°C pokrywają się całkowicie.

$$M_{20} = \int_0^t \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T(t)} \right) \right] dt \quad (1)$$

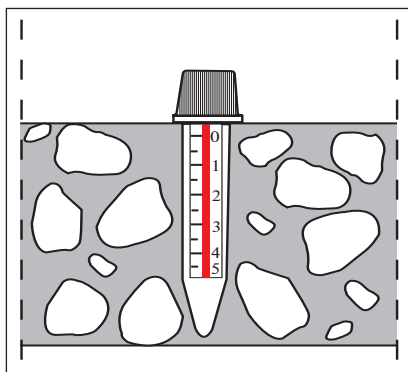
gdzie: M_{20} – liczba umownych dni dojrzewania betonu w temperaturze +20°C
 E – energia aktywacji w [KJ/mol]
 R – stała gazowa w [KJ/mol °K]
 T – temperatura w [°K]

Sam próbnik, widoczny na rys. 2, przypomina z wyglądu termometr. Składa się z plastikowej rurki, stanowiącej obudowę jego zasadniczej części, którą jest szklana

kapilara umieszczona na plastikowej podziałce. Kapilara wraz z podziałką i plastikową zakrętką stanowią jeden element, który może być wielokrotnie wyjmowany z rurki dla dokonania odczytów. Liczby na podziałce wyrażają stopień dojrzałości betonu, wyrażony w umownych dniach dojrzewania (M_{20}). Do pomiarów, zależnie od potrzeb, stosuje się dwa rodzaje próbników COMA-Meter:

- dostosowane do pomiaru stopnia zaawansowania dojrzałości betonu w okresie od 0 do 5 umownych dni dojrzewania (M_{20})
- dostosowane do pomiaru stopnia zaawansowania dojrzałości betonu w okresie od 0 do 14 umownych dni dojrzewania (M_{20}).

Osadzenie próbnika w świeżej mieszance betonowej przeprowadza się zgodnie z rys. 3, bezpośrednio po zakończeniu układania betonu. Jego uaktywnienie następuje w wyniku przełamania kapilary w pozycji „0” na skali. Zwykle przyjmuje się, iż w danym miejscu pomiarowym należy umieścić co najmniej trzy próbniiki. Sam pomiar stopnia dojrzałości betonu odbywa się poprzez odczytanie ze skali wartości M_{20} , odpowiadającej aktualnemu poziomowi płynu w kapilarze. Dla dokonania odczytu należy wyjąć kapilarę ze skalą z plastikowej rurki. Kolejne umieszczenie skali z kapilarą w zabetonowanej rurce powoduje kontynuację pomiaru. Wynik, którym jest wiek beto-



Rys. 3. Sposób osadzenia próbnika COMA-Meter w świeżej mieszance betonowej

nu, liczony w umownych dniach jego dojrzewania w temperaturze +20°C, odczytuje się bezpośrednio ze skali próbnika. Dla przykładu, uzyskanie odczytu, z którego wynika, iż aktualny wiek wbudowanego betonu wynosi 1 dzień, należy rozumieć następująco: w badanym obszarze wznoszonej konstrukcji proces dojrzewania betonu, a więc i jego wytrzymałość na ściskanie osiągnęły poziom, odpowiadający jednodniowej wytrzymałości betonu, dojrzewającego w laboratorium w temperaturze +20°C. Dla przeprowadzenia uśrednionej oceny

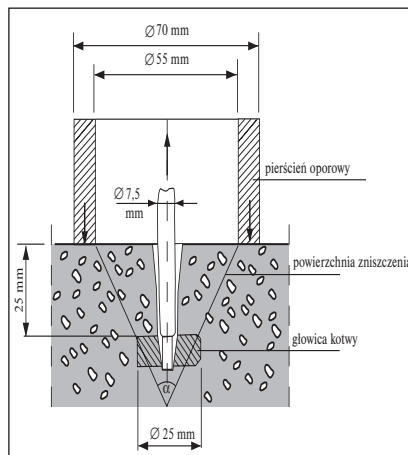
stopnia dojrzałości betonu w danym miejscu pomiarowym należy określić średnią arytmetyczną ze wszystkich odczytów, dokonanych w obrębie tego miejsca pomiarowego. Znajomość stopnia dojrzałości betonu „in-situ” (odczyt M_{20}) oraz krzywej, obrazującej przyrost wytrzymałości danego betonu w funkcji jego wieku, określony na próbkach normowych, dojrzewających w warunkach laboratoryjnych w temperaturze +20°C, pozwala zarazem na bezpośrednie oszacowanie jego aktualnej wytrzymałości na ściskanie w danym fragmencie konstrukcji. O wiarygodności tego rodzaju oszacowania może świadczyć między innymi fakt, iż metoda ta została usankcjonowana w amerykańskich przepisach normowych (ASTM C 1074-87).

Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie metodą LOK-Test

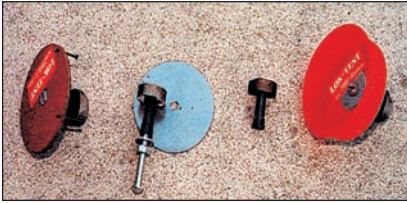
LOK-Test jest jedną z wersji metody „pull-out”, przewidzianą do oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach, będących w fazie realizacji. Jej istota, zilustrowana na rys. 4, polega na wrywaniu ze stwardniałego betonu uprzednio zabetonowanej w nim kotwy, o głowicy w kształcie okrągłego dysku o średnicy 25 mm, która dzięki przyjętemu rozwiązaniu technicznemu jest każdorazowo osadzana w świeżym betonie na głębokości równej jej średnicy. Kotwy wykorzystywane w tej metodzie (rys. 5) są dostosowane do różnych sposobów mocowania:

- gwoździami do wewnętrznych pionowych powierzchni form drewnianych (rys. 6)
- śrubami do wewnętrznych pionowych powierzchni form stalowych (rys. 7)
- jako „pływające”, przeznaczone do osadzenia w górnej warstwie betonu, np. w płytach (rys. 8).

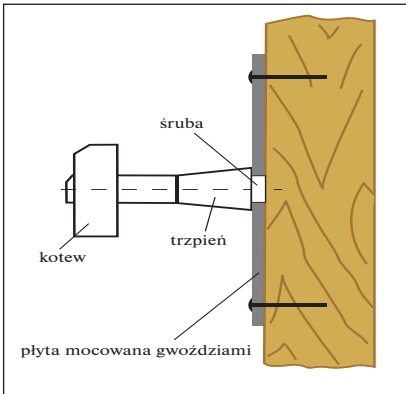
Znajomość siły wrywającej kotew pozwala w prosty sposób na określenie skorelowanej z nią wytrzymałości betonu na



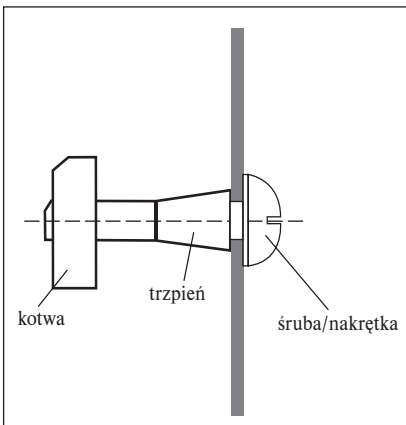
Rys. 4. LOK-Test – istota metody



Rys. 5. Widok zestawu stalowych kotew, wykorzystywanych w metodzie LOK-Test



Rys. 6. Sposób mocowania kotwy do deskowania za pomocą gwoździ



Rys. 7. Sposób mocowania kotwy do deskowania za pomocą śrub

ściskanie. Obciążenie jest przekazywane za pośrednictwem siłownika hydraulicznego, dostosowanego do tego rodzaju pomiarów (rys. 9). Siłownik ten z jednej strony przekazuje siłę wrywającą na trzpień kotwy, z drugiej zaś dociska powierzchnię betonu za pośrednictwem centralnego pierścienia oporowego, co wymusza złożony stan naprężenia, który w efekcie prowadzi do zniszczenia, charakteryzującego się ścisłą korelacją pomiędzy rejestrowaną siłą wrywającą kotew a wytrzymałością betonu na ściskanie, określaną na standardowych próbkach laboratoryjnych.

Korelacja ta, jak wykazały szerokie badania przeprowadzone w różnych ośrodkach naukowych, ma charakter ogólny. To znaczy, z wyjątkiem betonów na kruszywach lekkich oraz betonów o uziarnieniu kruszywa przekraczającym 32 mm, jest w zasadzie niezależna od wpływu parametrów materiałowych i technologicznych,

spośród których można wymienić między innymi: współczynnik w/c, rodzaj cementu, warunki dojrzewania, wiek betonu, zawartość ewentualnych dodatków, takich jak krzemionka, pyły czy też różnego rodzaju włókna. Zalecana krzywa korelacyjna ma charakter ogólny i w przypadku próbek kostkowych o boku 150 mm może być opisana następującymi dwoma równaniami:

$$f_{c,cub} = 1,41P - 2,82 \quad \text{– dla betonu o wytrzymałości do 50 MPa (2)}$$

$$f_{c,cub} = 1,59P - 9,52 \quad \text{– dla betonu o wytrzymałości wyższej od 50 MPa (3)}$$

gdzie:

$f_{c,cub}$ – wytrzymałość betonu na ściskanie, określona na kostkach o boku 150 mm i wyrażona w [MPa]

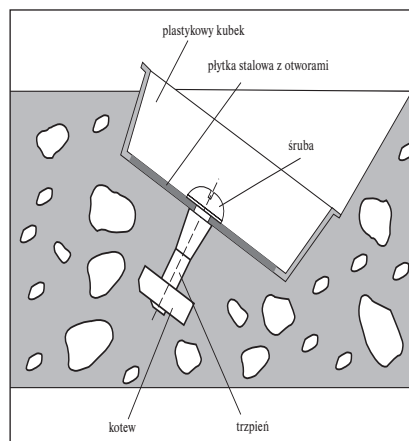
P – wartość siły wrywającej, wyrażona w [kN]

W praktyce nie ma potrzeby korzystania z powyższych wzorów, ponieważ na ich podstawie opracowano tabele przeliczeniowe, które pozwalają na bezpośrednie określenie wartości wytrzymałości betonu na ściskanie w zależności od zarejestrowanej wartości siły wrywającej kotew z betonu. Tabele takie dołączone są do każdego profesjonalnego zestawu pomiarowego.

Na podstawie uzyskanych wartości wytrzymałości betonu na ściskanie należy wyliczyć wartość średnią dla danego miejsca pomiarowego. Jakość betonu wbudowanego w danym miejscu pomiarowym można uznać za zadowalającą, jeśli wartość średnia jego wytrzymałości na ściskanie (f_c, cub – wytrzymałość „in-situ”) będzie nie niższa niż 80% projektowanej wartości wytrzymałości betonu na ściskanie, wyznaczonej zgodnie z PN-88/B-06250, przyjmując jej orientacyjną wartość na poziomie 1,3 – $f_{ck, cub}$ (wytrzymałości gwarantowanej betonu na ściskanie).

$$f_{c,cub} \geq 0,8 \times 1,3 \times f_{ck,cub} \quad (4)$$

LOK-Test, jako szybka i wygodna metoda oceny aktualnej wytrzymałości betonu na



Rys. 8. Sposób osadzenia kotwy „pływającej”



foto: Archiwum

Rys. 9. Widok siłownika hydraulicznego w czasie pomiaru

ściskanie, zyskała sobie powszechne uznanie w krajach skandynawskich (DS 423.31, SS 137238, NS 3679 oraz NT BUILD 211). Jest także znormalizowana w przepisach brytyjskich (British Standard BS 1881: Part 207:1992), niemieckich (DIN 8046), amerykańskich (ASTM C 900), a ponadto usankcjonowały ją także przepisy normowe o charakterze międzynarodowym (EN 12504-3).

Podsumowanie

Obie przedstawione powyżej metody diagnostyczne wzajemnie się uzupełniają i umożliwiają w pełni wiarygodną kontrolę aktualnych parametrów wytrzymałościowych betonu bezpośrednio na wznoszonym obiekcie. Dodatkowo zwiększenie dokładności uzyskiwanych wyników możliwe jest dzięki zastosowaniu obu technik pomiarowych łącznie, co w praktyce sprowadza się do wykorzystania metody COMA-Test do precyzyjnego określenia poszczególnych terminów badawczych dla metody LOK-Test, uwarunkowanych uzyskaniem przez beton założonego w projekcie stopnia dojrzałości. Biorąc pod uwagę niski koszt badania oraz możliwość uzyskania znacznych oszczędności w trakcie realizacji robót betonowych, wydaje się, iż obie proponowane metody diagnostyczne stanowią cenną alternatywę dla tradycyjnych sposobów kontroli jakości betonu, polegających na badaniu wytrzymałości betonu na ściskanie w laboratorium na próbkach pobieranych w trakcie betonowania lub uzyskiwanych z odwiertów kontrolnych.

dr inż. Andrzej Moczek
Instytut Budownictwa
Politechniki Wrocławskiej