

Jak ustalić najkrótszy termin rozdeskowania żelbetowych stropów monolitycznych (II)

Do wykonania monolitycznej konstrukcji żelbetowej niezbędne jest deskowanie i w związku z tym w trakcie realizacji pojawia się istotny problem do rozwiązania: kiedy można rozdeskować konstrukcję? Z jednej strony jak najszybsze rozdeskowanie istotnie obniża koszty inwestycji (efektywniejsze wykorzystanie deskowań; skrócenie ogólnego czasu budowy). Z drugiej strony zbyt szybkie rozdeskowanie konstrukcji może doprowadzić do jej trwałego uszkodzenia (wskutek nadmiernych odkształceń) lub zniszczenia. Interesy inwestora i wykonawcy są sprzeczne. Pytanie jest więc zasadnicze: jak ustalić najkrótszy termin, w którym można bezpiecznie rozdeskować konstrukcję z betonu (minimalny czas rozdeskowania).

Prognozowanie wytrzymałości świeżego betonu

Prawidłowe określenie wymaganej do rozformowania konstrukcji wytrzymałości betonu (f'_c) jest ważne dla bezpieczeństwa konstrukcji. Natomiast dla procesu inwestycyjnego ważne jest, aby określić, w jakim czasie beton osiągnie tę wytrzymałość. Ta informacja jest potrzebna do opracowania harmonogramu budowy, czyli ustalenia czasu realizacji inwestycji i jej kosztów. Prognozowanie terminu rozdeskowania i w związku z tym czasu budowy jest istotne nie tylko dla inwestora i wykonawcy, ale również dla innych uczestników procesu inwestycyjnego, np. firm wykonawczych składających oferty w przetargu na wykonanie obiektu, kredytodawców, producentów materiałów budowlanych itp.

Określenie czasu rozformowania wymaga znajomości funkcji wzrostu wytrzymałości betonu na ściskanie (rozciąganie) w czasie. Taką funkcję, wyrażoną równaniami (9) i (10), podaje norma [10].

$$f'_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f'_{cm,28} \quad (9)$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{s \left[-\sqrt{\frac{28}{t}} \right]} \quad (10)$$

Wartość współczynnika $\beta_{cc}(t)$ dla czasu t dni wyraża średnią wytrzymałość betonu dojrzewającego t dni w procentach jego wytrzymałości 28-dniowej, w zależności od klasy cementu. Przykładowe wartości współczynnika podano w tablicy 2.

Po określeniu wymaganej wytrzymałości rozformowania należy wyrazić ją w procentach wytrzymałości 28-dniowej. Odpowiednią wartość $f'_{cm}/f'_{cm,28}$ otrzymuje się wprost z równania (7)

$$f'_{cm} = \frac{q'}{q_d} f'_{cm,28} \quad (7)$$

lub po podzieleniu wartości obliczonych z równ. (6) lub (20)

$$f'_{cm} = \frac{1}{1-1,64v} f'_{ck} = \frac{1}{1-1,64v} 1,5 f'_{cd} = \beta f'_{cd} \quad (6)$$

$$f'_{cm} = \frac{6,086}{1-1,64v} \sqrt{(f'_{ctm})^3} \quad (20)$$

Tablica 2. Szacunkowe wartości średniej wytrzymałości betonu, dojrzewającego w warunkach zgodnych z [11], w procentach jego średniej wytrzymałości 28-dniowej

Klasa cementu	Czas dojrzewania betonu, dni							
	1	2	3	4	5	7	14	18
32,5N	20	35	46	54	59	68	85	91
32,5R 42,5N	34	50	60	66	71	78	90	94
42,5R 52,5N	42	58	66	72	76	82	92	95

przez wartość $f'_{c,28}$ [wg równ. (4)] właściwą dla przyjętej przy projektowaniu klasy betonu. Następnie termin rozdeskowania konstrukcji można ustalić na podstawie tablicy 2. Można również czas rozdeskowania obliczyć z równ. (21), które otrzymuje się po przekształceniu równ. (9) i (10):

$$t = \frac{28}{\left[1 - \frac{1}{s} \ln \frac{f'_{cm}}{f'_{c,28}} \right]^2} \text{ [dni]} \quad (21)$$

Przykładowo, dla wymaganej $f'_{cm} = 0,5 f'_{cm,28}$ czas rozdeskowania, obliczony z równ. (21), wynosi: 3,5 dnia po zastosowaniu cementu portlandzkiego 32,5N, 1,97 dnia dla 32,5R lub 42,5N oraz 1,4 dnia, gdy zastosuje się cement 42,5R lub 52,5N. W przypadku $f'_{cm} = 0,7 f'_{cm,28}$ uzyskuje się odpowiednio: 7,45, 4,75 oraz 3,61 dnia.

Zależność (9), podobnie jak (8) i (18), została opracowana przy założeniu, że beton dojrzewa w warunkach laboratoryjnych [11], tzn. m.in. przy stałej temperaturze 20°C.

$$E_{cm}(t) = \left[\frac{f'_{cm}(t)}{f'_{cm,28}} \right]^{0,3} E_{cm,28} \quad (8)$$

$$f'_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t) f'_{ctm,28} \quad (18)$$

W warunkach budowy temperatura otoczenia jest zmienna (formalnie istotna jest temperatura betonu w elemencie, która zależy nie tylko od temperatury otoczenia, ale również od ilości ciepła wydzielanego w procesie hydratacji). Aby określić rzeczywisty czas rozdeskowania, należy więc ustalić, w jakim czasie beton dojrzewający w warunkach zmiennych temperatur osiągnie taką samą wytrzymałość jak dojrzewając w temperaturze 20°C. W obliczeniach stosuje się pojęcia: stopnia dojrzałości betonu i funkcji temperatury twardniejącego betonu. Stopień dojrzałości można wyrazić procentem wytrzymałości 28-dniowej lub znając funkcję przyrostu wytrzymałości w czasie w stałej temperaturze, np. równ. (9) przy $T = 20^\circ\text{C}$, liczbą dni licząc od zabetonowania, które muszą upłynąć, aby beton dojrzewający w tej temperaturze (20°C) uzyskał wymaganą wytrzymałość. Jeżeli beton twardnieje w warunkach zmiennych temperatur, to stopień dojrzałości opisuje się funkcją:

$$m = \sum_{i=1}^n k(T_i) \Delta t_i \text{ [dni]} \quad (22)$$

gdzie: Δt_i to przedział czasu o stałej temperaturze T_i , natomiast $k(T_i)$ jest funkcją temperatury twardniejącego betonu definiowaną jako stosunek szybkości twardnienia w temperaturze T do szybkości twardnienia w temperaturze T_a (współczynnik szybkości przyrostu wytrzymałości betonu dojrzewającego w temperaturze innej niż T_a).

W literaturze znaleźć można wiele empirycznych funkcji $k(T)$ [2,3,14]. Przyjmując za Jamrozým [14] funkcję w postaci zaproponowanej przez Bergsröma:

$$k(t) = \frac{T + 10}{T_a + 10} \quad (23)$$

i podstawiając do rów. (22) przy $T_a = 20^\circ\text{C}$, otrzymuje się:

$$m = \sum_{i=1}^n 0,0333(T_i + 10)\Delta t_i \quad (24)$$

Ostatecznie, po określeniu z właściwego kryterium [(6), (7) lub (20)] wytrzymałości betonu na ściskanie wymaganej przy rozdeskowaniu i wyrażeniu jej w postaci $f_{cm}^r/f_{cm,28}$, wymagany stopień dojrzałości betonu rozformowywanej konstrukcji oblicza się z rów. (21). Rzeczywisty stopień dojrzałości betonu, obliczony z rów. (24), musi być co najmniej równy. W obliczeniach zazwyczaj przyjmuje się $\Delta t_i = 1$ dzień oraz średnie temperatury dobowe $T_i = T_{m,i}$.

Przykładowo. Jeżeli do rozdeskowania elementu z betonu na cementie portlandzkim 32,5R wymagana jest wytrzymałość betonu $f_{cm}^r = 0,7f_{cm,28}$, to niezbędny stopień dojrzałości wynosi wg rów. (21) $m^r = 4,75$ dnia. Przy zmiennych temperaturach otoczenia rzeczywisty stopień dojrzałości obliczamy z rów. (24). Z obliczeń, przedstawionych w tablicy 3, wynika, że przy założonych średnich temperaturach dobowych, odpowiedni do rozformowania stopień dojrzałości beton osiągnie po 8 dniach od zabetonowania.

Przedstawione procedury określania wymaganej przy rozdeskowaniu wytrzymałości betonu oraz prognozowania wytrzymałości świeżego betonu są wykorzystywane przy formułowaniu przepisów normowych i zaleceń wykonawczych dotyczących terminów usuwania deskowań elementów konstrukcyjnych. Przykładowo. Według obowiązujących w Polsce przepisów [4] do usuwania deskowań płyt stropowych można przystąpić, gdy beton osiągnie 15 MPa w okresie letnim i 17,5 MPa w okresie obniżonych temperatur. Według normy DIN [12] deskowania płyt stropowych można usunąć po 3 dniach, jeżeli stosowano cement 52,5N lub 42,5R, po 5 dniach przy stosowaniu cementu 42,5N lub 32,5R oraz po 8 dniach, jeżeli stosowano cement 32,5N. Terminy te dotyczą betonów dojrzewających w temperaturze powyżej 5°C , jeżeli temperatury są niższe, należy stosować terminy dwukrotnie dłuższe.

Już przy określaniu wymaganej przy rozformowaniu wytrzymałości betonu napotyka się na pewne trudności związane np. z prawidłowym ustaleniem wielkości obciążeń występujących w trakcie budowy (np. przypadkowe obciążenia powstające w czasie montażu i transportu materiałów). Ale szczególnie trudne jest prawidłowe ustalenie terminu rozdeskowania, czyli czasu, w którym beton osiągnie tę wytrzymałość. Należy bowiem ustalić funkcję przyrostu wytrzymałości betonu w czasie, a jest ona zależna od wielu czynników, m.in. od: rodzaju, klasy i ilości cementu; ilości i wartości w/c zaczynu; rodzaju i uziarnienia kruszywa; domieszek chemicznych; temperatury; pielęgnacji; czynników technologicznych (np. wibrowanie, próżniowanie). Z tych powodów wszelkie zalecenia, jak np. podane w [4, 12], zawierające konkretne wartości wytrzymałości, a w szczególności czasy rozformowania w dniach, są określane z dużym zapasem bezpieczeństwa i w żadnym razie nie są właściwym kryterium przy podejmowaniu decyzji o rozdeskowywaniu konstrukcji w jak najkrótszym czasie. Analiza teoretyczna przeprowadzona przez konstruktora, uwzględniająca różne sposoby rozdeskowania konstrukcji, nie tylko gwarantuje bezpieczeństwo budowli, ale pozwala prawidłowo określić wytrzymałość betonu wymaganą przy rozformowaniu, która jest zazwyczaj niższa od podawanej w zaleceniach. Podobnie jest w przypadku terminu rozdeskowania. Krótsze terminy rozdeskowania, od podanych w normach, uzyskuje się, gdy zgromadzi się więcej danych i zastosuje bardziej szczegó-

wą analizę dotyczącą szybkości przyrostu wytrzymałości betonu w czasie. W tym kontekście bardzo korzystna byłaby współpraca między konstruktorem, wykonawcą i producentem betonu. Producenci betonu dysponują wynikami badań doświadczalnych (czasami z wielu lat) przyrostu wytrzymałości betonu w czasie dla konkretnych betonów. Mogą również udostępnić informacje na temat jednorodności produkowanych przez nich betonów (współczynnika zmienności v) oraz rzeczywistych wytrzymałości 28-dniowych, które zazwyczaj są większe od przyjmowanych przy projektowaniu, normowych wytrzymałości dla odpowiednich klas betonów. Jeżeli w kryteriach rozformowania (6) i (20) oraz w rów. (4),

$$f_{cm} = f_{ck} + 8,0 \text{ [MPa]} \quad (4)$$

z którego wynika wartość $f_{cm,28}$ w kryterium (7), zamiast zalecanych przez normę [1] wartości współczynnika zmienności zastosuje się wartości rzeczywiste, które przy certyfikowanej kontroli produkcji są istotnie mniejsze, uzyska się mniejszą wartość wytrzymałości betonu wymaganą przy rozdeskowaniu f_{cm}^r i krótszy termin rozformowania. Krótszy termin rozformowania będzie również wynikiem większych rzeczywistych wytrzymałości 28-dniowych, gdyż określoną wytrzymałość f_{cm}^r beton uzyska szybciej. Warto zauważyć, że obecne przepisy normowe [15] nakładają na producenta betonu obowiązek dostarczenia, na życzenie wykonawcy, informacji w zakresie: wcześniejszych badań wytrzymałości betonu i rozwoju wytrzymałości betonu w czasie (do 28 dni).

Stosując przedstawione kryteria rozformowania można precyzyjnie określić wymaganą wytrzymałość rozformowania. Jednak krótki termin rozdeskowania zależy od szybkości przyrostu wytrzymałości betonu, na co istotny wpływ ma producent betonu, ponieważ zależy ona w istotny sposób od składu mieszanki betonowej. Z tego wynika, że ścisła współpraca wykonawcy i producenta jest niezbędna. Ponadto, znając wytrzymałość rozformowania producent może określić, jaki będzie koszt wykonania betonu, który osiąga taką wytrzymałość po np. 2, 3, 5 czy 7 dniach, co umożliwi planowanie kosztów budowy (zazwyczaj im szybciej beton osiąga określony procent wytrzymałości 28-dniowej, tym jest droższy).

Należy jednak przypomnieć, że choć metody prognozowania wytrzymałości świeżego betonu są użyteczne i korzysta się z nich przy planowaniu budowy, to nie mogą one stanowić ostatecznego kryterium przy podejmowaniu decyzji o usunięciu deskowania. Konieczna jest kontrola doświadczalna wytrzymałości betonu w konstrukcji.

Metody określania aktualnej wytrzymałości betonu w konstrukcji

Wytrzymałość świeżego betonu można oszacować na podstawie zależności pomiędzy wytrzymałością betonu na ściskanie a jego wiekiem. Krzywa ta określana jest na podstawie badania próbek przechowywanych w warunkach laboratoryjnych i nie uwzględnia rzeczywistych warunków, w jakich dojrzewa beton. Niemniej znajomość krzywej przyrostu wytrzymałości betonu w czasie pomocna jest w ustalaniu terminu rozdeskowania konstrukcji i niezbędna na etapie sporządzania harmonogramów robót.

Tablica 3. Przykład obliczania czasu rozdeskowania elementu dojrzewającego przy zmiennych temperaturach otoczenia

Doba po zabetonowaniu	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_{m,i}$, $^\circ\text{C}$	15	12	10	8	8	9	6	8
$k(T_{m,i})\Delta t_i$, dni [wg rów. (24)]	0,833	0,733	0,666	0,599	0,599	0,633	0,533	0,599
$\sum k(T_{m,i})\Delta t_i$, dni	0,833	1,566	2,232	2,831	3,430	4,063	4,596	5,195

Najczęściej zalecanym sposobem kontroli wytrzymałości świeżego betonu jest wykonanie badania na minimum 3 próbkach, które zostały pobrane w czasie betonowania i poddane zabiegom takim jak elementy w konstrukcji [4, 5, 6]. Następnie określa się wartość średnią wytrzymałości na ściskanie. Jeżeli jest ona co najmniej równa wytrzymałości rozformowania ustalonej na podstawie odpowiedniego kryterium [(6), (7), (20)], konstrukcję można rozdeskować. Wytrzymałość określona na próbkach nie uwzględnia jednak wpływu wielkości i kształtu próbek oraz zwiększonej temperatury elementu wynikającej z ciepła hydratacji cementu. Różnica pomiędzy wytrzymałością betonu określaną na próbkach a wytrzymałością betonu w konstrukcji może być znaczna. W brytyjskich przepisach normowych [16] zaleca się metodę, która pozwala uzyskać podobne warunki dojrzewania betonu jak w konstrukcji poprzez przechowywanie próbek w specjalnych pojemnikach z wodą, gdzie temperatura utrzymywana jest na tym samym poziomie co w konstrukcji. Aktualną wytrzymałość betonu można również potwierdzić metodami nieniszczącymi poprzez badania sklerometryczne (PN-74/B-06262) lub ultradźwiękowe (PN-74/B-06261).

Waga problemu określania wytrzymałości świeżego betonu w obiekcie („in-situ”) doprowadziła do powstania wielu metod diagnostycznych i wprowadzenia ich do unormowań krajowych. Przykładowo, raport CIRIA [2] zaleca następujące metody oceny wytrzymałości betonu:

- metodę „pull-out”, która polega na pomiarze wielkości siły niezbędnej do wyrwania kotwy stalowej z betonu. Kotwę tą może być osadzana podczas betonowania lub w otworze wykonanym w stwardniałym betonie. Odmianą tej metody jest LOK-Test [17] zalecany przez normę brytyjską BS 1881: Part 207: 1992 i amerykańską ASTM C 900
- metodę pozwalającą na bezpośrednią ocenę stopnia dojrzałości betonu w konstrukcji, wyrażonego w dniach, po których beton ten, dojrzewając w warunkach normowych, osiągnąłby analogiczną wytrzymałość na ściskanie. Metoda polega na pomiarze temperatury dojrzewającego betonu w konstrukcji i obliczeniu na tej podstawie dojrzałości betonu lub też pomiarze ilości odparowanej cieczy z próbki zanurzonej w betonie. Znajomość, dla danego rodzaju betonu, zależności pomiędzy stopniem dojrzałości betonu a jego wytrzymałością na ściskanie pozwala na określenie aktualnej wytrzymałości betonu w konstrukcji. Funkcja dojrzałości betonu pozwala na ciągłe monitorowanie cech świeżego betonu, przy uwzględnieniu temperatury otoczenia, wilgotności powietrza, prędkości i kierunku wiatru [18]. Metoda, znana jako COMA-Test [17,19], zalecana jest przez normę ASTM C 1074
- metody wykorzystujące korelację pomiędzy twardością betonu a jego wytrzymałością na ściskanie. Z grona tych metod najpopularniejszy jest tzw. Windsor Test, który polega na wciskaniu stalowego trzpienia w beton z określoną energią kinetyczną i pomiarze zagłębienia trzpienia (BS 1881 Part: 207; ASTM C 803)
- metodę „break-off” polegającą na wytworzeniu w konstrukcji walca betonowego (poprzez wiercenie lub stosowanie osłon z tworzyw sztucznych podczas betonowania) i pomiarze siły, przyłożonej do jego górnej powierzchni, która powoduje jego wyłamanie.

Ostatnio prowadzone są prace nad stosowaniem metod ultrasonograficznych, znanych w diagnostyce konstrukcji betonowych, do określania wytrzymałości betonu. Istnieje bowiem korelacja pomiędzy czasem przejścia przez element fal sprężystych wzbudzonych w materiale (emiter i czujnik usytuowane są po przeciwnych stronach elementu) [20] lub fali odbitej (emiter i czujnik znajdują się po tej samej stronie) [21], a wytrzymałością betonu. W większości testów nieniszczących istnieje konieczność sporządzenia krzywych korelacji pomiędzy bezpośrednim pomiarem a wytrzymałością betonu na ściskanie. Warto więc zwrócić uwa-

gę na pracę Hoły i Schabowicza [22], którzy stosując metody sztucznej inteligencji stwierdzili, że dysponując odpowiednio szerokim zbiorem danych dotyczących betonów o różnych składach, uzyskanych za pomocą kilku metod nieniszczących, można wiarygodnie, za pomocą sieci neuronowej nauczonej na tym zbiorze, prognozować wytrzymałość na ściskanie podobnych betonów wbudowanych w konstrukcję.

dr inż. Sławomir Biruk
dr inż. Waldemar Budzyński
Instytut Budownictwa Politechniki Lubelskiej

Literatura

- 1 PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie, PKN, 2002
- 2 T. A. Harrisom, *Formwork Striking Times – criteria, prediction and methods of assessment*. CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) Report 136, 1995
- 3 Praca zbiorowa, *Budownictwo Betonowe, T VI, Przygotowanie, transport i układanie betonu*, Arkady, 1973
- 4 *Warunki techniczne wykonywania i odbioru robót budowlano-montażowych, Część 1. Budownictwo Ogólne*, Arkady, 1989
- 5 ENV 13670-1 *Wykonywanie konstrukcji betonowych*
- 6 ACI 318-02 *Building Code Requirements for structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)*, American Concrete Institute, 2002
- 7 BS8110: Part 1:1985, *Structural use of concrete: Code of practice for design and construction*, British Standards Institution, 1985
- 8 B. M. Sadgrove, *The early development of strength in concrete*, CIRIA Technical Note 12, 1970
- 9 B. M. Sadgrove, *The strength and deflection of reinforced concrete beams loaded at early age*, CIRIA Technical Note 31, 1971
- 10 Eurokod 2, *Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*, Wersja polska ENV 1992-1-1: 1991, ITB, 1992
- 11 PN-EN 12390-3 *Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielegnacja próbek do badań wytrzymałościowych*, PKN, 2000
- 12 DIN 1045, *Taschenbuch: Beton – und Stahlbetonarbeiten*, 1988
- 13 Praca zbiorowa, *Komentarz naukowy do PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone, T. I*, ITB, 2005
- 14 Z. Jamroży, *Beton i jego technologie*, PWN, 2003
- 15 PN-EN 206-1 *Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*, PKN, 2003
- 16 BSI DD 92:1984 *Method for temperature-matched curing of concrete specimens*, British Standards Institution
- 17 A. Moczko, *Nowoczesne metody nieniszczącej kontroli wytrzymałości dojrzewającego betonu*, „Polski Cement”, numer specjalny, maj 2002, s. 35-37
- 18 R. Gajewski, Ł. Szabat, *System symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji*, *Polski Cement*, kwiecień-maj 2005, s. 42-45
- 19 A. Moczko, *Współczesne metody nieniszczącej diagnostyki konstrukcji betonowych*, *Polski Cement*, październik-grudzień 2001, s. 48-50
- 20 H.-W. Reinhardt, C. Große, A. Herb, *Ultrasonic monitoring of setting and hardening of cement mortar – a new device*, *Materials and Structures*, 33 (233) 2000, pp. 580-583
- 21 Y. Akkaya, T. Voigt, K. V. Subramaniam, S. P. Shah, *Nondestructive Measurement of Concrete Strength Gain by an Ultrasonic Wave Reflection Method*, *Materials and Structures*, October 2003
- 22 J. Hoła, K. Schabowicz, *Nowy sposób identyfikacji wytrzymałości betonu na podstawie badań nieniszczących*, „Inżynieria i Budownictwo”, 10/2004, s. 546-549