

# Jak ustalić najkrótszy termin rozdeskowania żelbetowych stropów monolitycznych (1)

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).

Konstrukcję można rozdeskować wówczas, gdy beton osiągnie taką wytrzymałość, aby mógł z odpowiednim zapasem bezpieczeństwa przenieść naprężenia spowodowane obciążeniami występującymi w czasie budowy. Znaczenie prawidłowego określenia minimalnego czasu rozdeskowania zależy od rodzaju elementu konstrukcyjnego. Ze szczególną ostrożnością należy usuwać poziome elementy deskowania stropów, które wraz z podporami deskowania przenoszą ciężar stropu i wyłączają go z pracy statycznej, aż do momentu rozdeskowania. Natomiast pionowe elementy deskowań belek, słupów, ścian, które zasadniczo przenoszą jedynie parcie mieszanki betonowej, można usunąć znacznie wcześniej, krótko po zakończeniu procesów wiązania. Mając na uwadze najkrótszy termin rozdeskowania stropów, zasadniczo można wyróżnić trzy sposoby postępowania:

- całkowite usunięcie deskowań i podpór; stosowany, gdy strop osiągnie wystarczającą nośność do przeniesienia obciążeń powstających w czasie budowy
- całkowite usunięcie deskowań przy jednoczesnym pozostawieniu wszystkich lub części podpór (ten sposób postępowania w literaturze anglojęzycznej określany jest terminem *backshoring* lub *backpropping*)
- całkowite usunięcie deskowań i podpór, a następnie ponowne wprowadzenie określonej liczby podpór (ten sposób postępowania w literaturze anglojęzycznej określany jest terminem *reshoring* lub *repropping*).

Drugi i trzeci z wymienionych sposobów postępowania stosuje się, aby zabezpieczyć strop przed nadmiernymi odkształceniami (uszkodzeniem) świeżego betonu oraz przy realizacji budynków wielokondygnacyjnych, gdy strop musi przyjąć funkcję podpory stropu (lub stropów) betonowanego powyżej.

Należy zwrócić uwagę, że w sytuacji usunięcia deskowania i pozostawienia podpór lub ponownego podparcia stropu zmieni się jego schemat statyczny. Nad podporami wystąpią ujemne momenty zginające. Ponadto przy oparciu stropu na niewielkich powierzchniach głowic podpór, szczególnie przy stosowaniu głowic opadowych, pojawia się niebezpieczeństwo przebiccia stropu. Są to szczególnie niebezpieczne sytuacje, ponieważ podpory są podporami tymczasowymi, które występują jedynie w trakcie realizacji budowy. Konstruktor może je uwzględnić przy projektowaniu stropu tylko wtedy, gdy zna sposób postępowania przy rozdeskowywaniu. W przeciwnym wypadku należy zachować szczególną ostrożność przy usuwaniu deskowania, po-

nieważ w stropie, w obszarze podpór, mogą wystąpić naprężenia rozciągające, na które strop nie był wymiarowany.

Ustalenie właściwego sposobu postępowania przy rozdeskowywaniu konstrukcji w możliwie najkrótszym czasie jest niezwykle ważnym zagadnieniem z punktu widzenia bezpieczeństwa, wymaganej użyteczności oraz trwałości wykonywanej i eksploatowanej konstrukcji żelbetowej. Problem ten musi być należycie rozwiązany nie tylko przez projektanta deskowania i personel techniczny budowy, ale również przez projektanta konstrukcji. Pewne rozwiązania stosowane przy rozdeskowywaniu są możliwe do zastosowania, przy zachowaniu właściwego bezpieczeństwa konstrukcji, tylko wtedy gdy zostaną uwzględnione już na etapie wymiarowania konstrukcji (stropu). Wobec tego zanim rozpocznie się budowę, należy opracować projekt zawierający procedurę i harmonogram rozdeskowywania oraz analizę statyczną uwzględniającą wpływ tych procesów na pracę konstrukcji. A do tego niezbędny jest projekt konstrukcyjny. Czyli prawidłowe i optymalne rozwiązanie problemu rozdeskowywania jest możliwe wyłącznie przy równoczesnym opracowywaniu obu projektów.

## Kryteria rozformowania

Zgodnie z normą [1] konstrukcję należy tak zaprojektować i wykonać, aby z należyтым prawdopodobieństwem nie nastąpiło przekroczenie SGN i SGU. W obliczeniach sprawdzających należy uwzględnić trwałą sytuację obliczeniową występującą w czasie eksploatacji obiektu oraz sytuację przejściową, które w przypadku konstrukcji monolitycznych występują podczas wykonywania budynku. Taką właśnie sytuacją jest rozdeskowywanie konstrukcji w terminie, w którym beton nie osiągnął jeszcze wytrzymałości na ściskanie zgodnej z założeniem projektowym ( $f'_c < f_{c,28}$ ).

Aby określić termin rozdeskowania, należy więc wykazać, że element konstrukcyjny ma odpowiednią nośność do przeniesienia obciążeń, które działają na element po rozdeskowaniu i nie dozna przy tym nadmiernych odkształceń (ugięć). Kryterium nośności jest podstawowym kryterium rozformowania. Stosując metodę SG, można określić wytrzymałość betonu wymaganą przy rozformowaniu ( $f'_c$ ) na podstawie analizy sił wewnętrznych (naprężeń) w przekroju elementu w SG nośności.

Na podstawie wyników badań [2] można stwierdzić, że obciążenie elementu we wczesnym wieku momentem zginającym o wartości nieprzekraczającej 87% nośności elementu na zginanie w tym wieku nie ma istotnego negatywnego wpływu na nośność (projektowaną) elementu na zginanie. Oznacza to, że element we wczesnym wieku może bezpiecznie przenieść moment zginający, którego wartość stanowi taki sam procent wartości momentu obliczeniowego (projektowanego) jaki procent wytrzymałości 28-dniowej (projektowanej) stanowi wytrzymałość betonu w rozważanej chwili:

$$\frac{M^r}{M_d} = \frac{f'_c}{f_{c,28}} \quad (1)$$

Na podstawie równ. (1) można określić wytrzymałość betonu wymaganą przy rozdeskowaniu:

$$\frac{M^r}{M_d} = \frac{f'_c}{f_{c,28}} \quad (2)$$

gdzie:

$f'_c$  – wytrzymałość betonu przy rozformowaniu

$f_{c,28}$  – projektowana, 28-dniowa wytrzymałość betonu

$M^r$  – moment zginający spowodowany obciążeniami w chwili usunięcia deskowania

$M_d$  – moment zginający eksploatacyjny (projektowany).

Równ. (2) stanowi alternatywny, względem analizy sił przekrojo-

wych, sposób wyznaczania wytrzymałości betonu w chwili rozdeskowania, co zostało teoretycznie potwierdzone przez Flagę [3]. Warto dodać, że wartość wytrzymałości  $f'_c$  określona z rów. (2) jest przeszacowana o około 5%, co powoduje nieznaczne wydłużenie terminu rozdeskowania.

Do usunięcia deskowania można przystąpić tylko wtedy, gdy beton rzeczywiście osiągnie wytrzymałość określoną na podstawie obliczeń. Przepisy normowe lub wytyczne we wszystkich krajach [4,5,6] wymagają, aby zostało to potwierdzone wynikami badań na próbkach kontrolnych lub metodami nieniszczącymi. W celu zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa rozformowywanej konstrukcji należy przyjąć, że wartość wytrzymałości betonu określona z analizy statycznej jest wartością obliczeniową ( $f'_{cd}$ ). Aby określić wartość wytrzymałości, która musi zostać potwierdzona doświadczalnie, należy ustalić odpowiadającą jej wytrzymałość średnią. Zgodnie z [1] charakterystyczna wytrzymałość betonu jest równa:

$$f_{ck} = \gamma_c f'_{cd} = 1,5f'_{cd} \quad (3)$$

a średnia wytrzymałość:

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

W ogólnym przypadku, przy założeniu normalnego rozkładu wytrzymałości:

$$f_{cm} = \frac{f_{ck}}{1-1,64v} \quad (5)$$

Z rów. (5), po uwzględnieniu rów. (4), wynika, że w normie [1] przyjęto zróżnicowane wartości współczynnika zmienności  $v$  w zależności od klasy betonu. Wartości te maleją ze wzrostem wytrzymałości betonu i wynoszą, przykładowo:  $v = 0,244$  dla betonu klasy C 12/15,  $v = 0,203$  dla C 16/20,  $v = 0,173$  dla C 20/25 i  $v = 0,148$  dla C 25/30. Jest to zgodne z wynikami doświadczeń, w których obserwuje się zjawisko zwiększania jednorodności betonu (zmniejszania współczynnika  $v$ ) ze wzrostem wytrzymałości betonu. Można więc średnią wytrzymałość betonu wymaganą przy rozformowaniu określić wg zależności:

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

Przyjmując zgodnie z [1] zalecenie (4), z którego wynikają określone wartości współczynnika zmienności dla odpowiednich klas betonu, otrzymuje się następujące wartości współczynnika  $\beta$ :  $\beta = 2,51$  dla betonu klasy C 12/15,  $\beta = 2,25$  dla C 16/20,  $\beta = 2,10$  dla C 20/25 i  $\beta = 1,98$  dla C 25/30. W konsekwencji z rów. (6) wynika, że całkowite rozformowanie elementu jest możliwe wówczas, gdy wytrzymałość betonu w elemencie, potwierdzona wynikami badań, będzie około dwukrotnie większa niż naprężenie, które wystąpi w betonie po rozdeskowaniu. Stosując zalecenie (4) otrzymuje się kryterium rozdeskowania zgodne z zaleceniem Flagi [3] oraz normy brytyjskiej [7].

Zastosowanie kryterium (6) wymaga przeprowadzenia analizy sił wewnętrznych w przekroju w chwili rozdeskowywania elementu. Rozważania można uprościć, określając wymaganą średnią wytrzymałość betonu z zależności (2). Ponadto, ponieważ wartości momentów zginających są proporcjonalne do obciążeń, kryterium rozdeskowania wynikające z nośności można ostatecznie wyrazić w funkcji obciążeń:

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

gdzie:  $f_{cm,28}$  wytrzymałość, dla odpowiedniej klasy betonu (projektowanej), należy obliczyć z zależności (4);  $q'$  – obciążenie działające na konstrukcję po rozformowaniu;  $q_d$  – obciążenie eksploatacyjne (projektowane).

Z kryterium (7) wynika, że wytrzymałość betonu przy rozformowaniu jest wprost proporcjonalna do wartości stosunku obciążeń ( $q'/q_d$ ), a wobec tego będzie wymagana większa wytrzymałość (dłuższy termin rozdeskowania), gdy dominującym obciążeniem jest ciężar własny stropu, tzn. przy małej wartości obciążeń

zmiennych technologicznych, np. w budynkach mieszkalnych, hotelach, biurach, salach lekcyjnych itp., a w szczególności np. stropodachach czy przekryciach zbiorników nadziemnych znacznych rozpiętościach elementów konstrukcyjnych (np. w stropach bezbelkowych lub belkowych z płytami krzyżowo zbrojonymi), ponieważ przy zwiększeniu rozpiętości, aby przeciwdziałać nadmiernym ugięciom, konieczne jest zwiększenie grubości stropu (sztywności), przez co zwiększa się udział ciężaru własnego w całkowitym obciążeniu eksploatacyjnym.

Ponadto większa wytrzymałość betonu przy rozformowaniu stropu będzie wymagana, gdy przewiduje się, że w trakcie budowy strop stanowiąc będzie podparcie stropu betonowanego powyżej.

Z badań doświadczalnych, np. [8,9] przeprowadzonych na próbkach betonowych i elementach żelbetowych we wczesnym wieku, tzn. w których beton nie osiągnął wymaganej wytrzymałości 28-dniowej, wynika, że przyrost wytrzymałości betonu na ściskanie w czasie, określony w procentach jego wytrzymałości 28-dniowej, jest mniejszy niż przyrost wytrzymałości przyczepności między betonem a stalą, oraz w przybliżeniu równy przyrostowi wytrzymałości betonu na rozciąganie. Wobec tego nośność przekroju na zginanie elementu żelbetowego z betonu świeżego jest wprost proporcjonalna do aktualnej wytrzymałości betonu na ściskanie, natomiast wytrzymałość przyczepności i wytrzymałość na rozciąganie nie stanowią warunku ograniczającego przy określaniu kryterium rozdeskowania. Dodatkowo można stwierdzić, że jeżeli termin rozdeskowania konstrukcji zostanie określony na podstawie kryterium nośności, to nie będzie to miało negatywnego wpływu na zarysowanie konstrukcji (rozstaw i szerokość rys).

Określając termin rozdeskowania konstrukcji, należy spełnić wymagania normy [1] w zakresie SG ugięć. W tym aspekcie należy rozważyć dwa istotne problemy. Po pierwsze, bezpośrednio po rozdeskowaniu konstrukcja może doznać nadmiernych ugięć doraźnych z powodu niższej wartości modułu sprężystości świeżego betonu od projektowanej wartości 28-dniowej. Po drugie, wartość ugięcia długotrwałego może być znaczna z powodu obciążenia konstrukcji



Tablica 1. Szacunkowe wartości modułu sprężystości betonu, dojrzewającego w warunkach zgodnych z [11], w procentach jego wartości 28-dniowej

Klasa cementu	Czas dojrzewania betonu, dni							
	1	2	3	5	7	10	14	28
32,5N	62	73	79	85	89	92	95	100
32,5R 42,5N	72	81	86	90	93	95	97	100
42,5R 52,5N	77	85	88	92	94	96	97	100

w młodym wieku. W tym drugim przypadku należy w obliczeniach uwzględnić różne wartości obciążenia w czasie budowy i po oddaniu obiektu do eksploatacji. W obliczeniach ugięć można zazwyczaj pominąć wpływ skurczu, jeżeli beton jest odpowiednio pielęgnowany i zachowana jest wymagana normą odległość pomiędzy dylatacjami. Warto zauważyć, że wielkość i rozkład odkształceń w elemencie spowodowanych skurczem zależy od tarcia mieszanki betonowej o deskowanie i z tego powodu wczesne rozformowanie konstrukcji jest korzystne. W polskiej normie [1] nie ma żadnych zaleceń dotyczących określania wartości modułu sprężystości świeżego betonu. Zależność, na podstawie której można oszacować moduł sprężystości dojrzewającego betonu, podaje np. norma EC2 [10]:

$$E_{cm}(t) = \left[ \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm,28}} \right]^{0,3} E_{cm,28} \quad (8)$$

gdzie:  $E_{cm}(t)$  i  $f_{cm}(t)$  oraz  $E_{cm,28}$  i  $f_{cm,28}$  są wartościami średniego modułu sprężystości i średniej wytrzymałości betonu, odpowiednio w wieku dni (np. przy rozformowaniu) i 28 dni (przyjmowanej przy projektowaniu).

Średnią wytrzymałość betonu na ściskanie w wieku dni, dojrzewającego w warunkach określonych w normie [11] (m.in. przy średniej temperaturze 20°C), można wg [10] oszacować na podstawie relacji:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm,28} \quad (9)$$

w której współczynnik  $\beta_{cc}(t)$  opisany jest zależnością:

$$\beta_{cc}(t) = e^{s \left[ 1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right]} \quad (10)$$

gdzie:  $t$  – wiek betonu w dniach;  $s$  – współczynnik zależny od rodzaju cementu:  $s = 0,20$  dla szybko twardniejącego cementu wysokiej wytrzymałości (CEM 52,5N, CEM 42,5R);  $s = 0,25$  dla normalnie i szybko twardniejącego cementu (CEM 42,5N, CEM 32,5R);  $s = 0,38$  dla wolno twardniejącego cementu (CEM 32,5N).

Na podstawie równ. (8), uwzględniając równ. (9), można określić wartość modułu sprężystości betonu w wieku dni w procentach jego wartości 28-dniowej:

$$\frac{E_{cm}(t)}{E_{cm,28}} = [\beta_{cc}(t)]^{0,3} \quad (11)$$

Przykładowe wartości obliczone na podstawie równ. (11) zostały przedstawione w tablicy 1.

Warto zauważyć, że przy zastosowaniu cementu normalnie i szybko twardniejącego po 3 dniach dojrzewania beton osiąga  $E_{cm,3} = (0,86 \div 0,88) E_{cm,28}$ . Natomiast jeżeli planuje się szybkie rozdeskowanie konstrukcji, zazwyczaj nie jest wskazane stosowanie cementu wolno twardniejącego (32,5N).

Doraźne ugięcie elementu po rozdeskowaniu można obliczyć przy określeniu wartości  $E_{cm}(t)$  z równ. (11).

Przy obliczaniu ugięcia długotrwałego należy uwzględnić pełzanie betonu. Współczynnik pełzania można wyznaczyć wg procedury podanej w [1]. Jednak prawidłowe obliczenie wartości współczynnika pełzania nie jest łatwe, ponieważ wymagana jest znajomość szeregu parametrów zmiennych w czasie, które są często trudne do określenia, szczególnie przy krótkim terminie rozdeskowania elementu. Określając wpływ krótkiego terminu rozformowania na długotrwałe ugięcie elementów, warto wziąć pod uwagę wyniki prac Sadgrove'a [9]. Na podstawie analizy teoretycznej wykazał on, że obciążenie elementu we wczesnym wieku, gdy beton osiąga 13, 27, 40 i 67% swojej wytrzymałości 28-dniowej, momentem zginającym o wartości nieprzekraczającej 67% nośności na zginanie w tym wieku, powoduje zwiększenie ugięcia długotrwałego o odpowiednio 25, 25, 9 i 3%. Spełnienie warunku (6) gwarantuje, że przy rozdeskowaniu nośność elementu będzie wykorzystana w nie więcej niż 50%. Ponadto obciążenie od ciężaru własnego stanowi w stropach co najmniej 40 ÷ 50% obciążenia eksploatacyjnego, co zgodnie z (7) gwarantuje, że przy rozdeskowaniu beton osiąga przynajmniej 40 ÷ 50% projektowanej wytrzymałości 28-dniowej. Tak więc zgodnie z badaniami Sadgrove'a, obciążenie stropu we wczesnym wieku może spowodować wzrost jego ugięcia długotrwałego o maksymalnie 10% w stosunku do ugięcia wywołanego obciążeniem przyłożonym, gdy beton osiągnie założoną wytrzymałość 28-dniową.

Analizując ugięcie elementu rozformowanego we wczesnym wieku, warto jeszcze wziąć pod uwagę następujące uwagi ogólne:

1) Wartości  $f_{cm,28}$  i  $E_{cm,28}$  stosowane w obliczeniach wynikają z normowej (minimalnej) wytrzymałości charakterystycznej dla odpowiedniej, przyjętej w projekcie, klasy betonu. Zazwyczaj wytrzymałość betonu jest po 28 dniach wyższa od projektowanej. Wobec tego wartości  $E_{cm,28}$  i  $E_{cm}(t)$  (i sztywność elementu) będą większe od założonych, a ugięcia mniejsze.

2) Zwykle przy projektowaniu ustala się wymiary elementu (grubość płyty, wysokość belki) z warunku nieprzekroczenia ugięć dopuszczalnych. Korzysta się przy tym z uproszczonego warunku  $(I_{eff}/d) \leq (I_{eff}/d)_{max}$ , co w konsekwencji powoduje, że ugięcia elementów są znacznie mniejsze od granicznych.

Uwzględniając powyższe rozważania można stwierdzić, że obciążenie stropu we wczesnym wieku nie spowoduje istotnego zwiększenia jego ugięcia. Jeżeli termin rozdeskowania konstrukcji zostanie ustalony na podstawie kryterium nośności, to wymagania w zakresie użyteczności również będą spełnione.

Ugięcia elementów stropu rozdeskowanego we wczesnym wieku zawsze jednak będą większe od ugięć elementów, w których beton osiągnął projektowaną wytrzymałość 28-dniową przed usunięciem deskowania. Gdy wymagane jest specjalne ograniczenie ugięć, należy wg [12] albo pozostawić stemple po rozdeskowaniu,



ft. Archiwum

albo podeprzeć element stemplami w rozstawie nieprzekraczającym 3 m. Można również ograniczyć ugięcie elementu poprzez zastosowanie (zaprojektowanie) betonu o mniejszej odkształcalności doraźnej (większym  $E_{cm}$ ) i mniejszym pełzaniu. Przykładowo, rodzaj zastosowanego kruszywa ma istotny wpływ na wartość modułu sprężystości betonu  $E_{cm,28}$  i zgodnie z równ. (11) na  $E_{cm}$ . Przyjmowana w obliczeniach zgodnie z [1] wartość  $E_{cm}$  odnosi się do betonu na kruszywie kwarcytowym (otczakowym). Beton na kruszywie bazaltowym wykazuje większy moduł sprężystości i zgodnie z [10] można w obliczeniach przyjmować  $1,2 E_{cm}$ . Natomiast planując wczesne rozdeskowanie konstrukcji, niekorzystne jest stosowanie betonu na kruszywie granitowym, ponieważ charakteryzuje się on mniejszym w stosunku do betonu na kruszywie otczakowym modułem sprężystości nawet ponad 20% [13].

Należy pamiętać, że jeżeli po rozdeskowaniu stropu planuje się pozostawienie lub ponowne wprowadzenie podpór (stempli), zmieni się jego schemat statyczny. Ten tymczasowy stan stropu może decydować o terminie rozdeskowania. W zasadzie aby można było zastosować takie rozwiązania, powinny one zostać uwzględnione przez konstruktora na etapie projektowania stropu, ponieważ płyty stropów, ze względu na eksploatacyjny schemat statyczny, w większości przypadków nie są zbrojone w przęstach górą. Jeżeli nie stosuje się zbrojenia górnego na ujemne momenty powstające nad tymczasowymi podporami, to o terminie rozdeskowania będzie decydowała nośność na zginanie przekroju betonowego (niezbrojonego) z uwzględnieniem młodego wieku betonu. Maksymalne naprężenia rozciągające powstające w przekroju nad tymczasową podporą, czyli wymaganą przy rozformowaniu wytrzymałość betonu, można obliczyć z wzoru:

$$f_{ct} = \frac{M'}{W_c} \quad (12)$$

gdzie  $W_c$  jest wskaźnikiem wytrzymałości przekroju betonowego na zginanie.

Przyjmując, że wartość wytrzymałości w równ. (12) jest wartością obliczeniową, należy wyznaczyć odpowiadającą jej średnią wytrzymałość, która musi zostać potwierdzona doświadczalnie przed usunięciem deskowania. Wykorzystując zależności z norm [1,10] otrzymuje się:

$$f_{ctm} = \frac{f_{ctk}}{0,7} = \frac{\gamma_c f_{ctd}}{0,7} = \frac{1,8 f_{ctd}}{0,7} = 2,57 f_{ctd} \quad (13)$$

Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu  $f_{ct,n}$  jest większa niż przy osiowym rozciąganiu. Odpowiednia zależność wg [1] ma postać:

$$f_{ct,fl} = 1,3 f_{ct} \quad (14)$$

i, jak wynika z [10], dla płyt o grubości do 30 cm przyjęta jest bezpiecznie.

Uwzględniając równ. (12) ÷ (14) wymaganą średnią wytrzymałość betonu na rozciąganie (kryterium rozdeskowania) można określić z zależności:

$$f'_{ctm} = \frac{2,57}{1,3} f_{ctd} = 1,98 f_{ctd} = 1,98 \frac{M'}{W_c} \quad (15)$$

Warto zauważyć, że wartość momentu  $M'$ , a wobec tego również  $f'_{ctm}$  i termin rozformowania, zależy od rozstawu podpór oraz że w większości przypadków dokładne obliczenie  $M'$  wymaga zastosowania metody MES.

Jeżeli w płycie nad tymczasową podporą występuje odpowiednie zbrojenie górne, to właściwym kryterium rozformowania będzie równ. (6).

Przy sprawdzaniu nośności płyty na przebiecie nad tymczasową podporą należy zgodnie z [1] wykazać, że:

$$N_p \leq u_p d_m f_{ctd} \quad (16)$$

W tym przypadku kryterium rozformowania będzie miało postać [zgodnie z równ. (13) przy  $\gamma_c = 1,5$  jak dla konstrukcji żelbetowych]:

$$f'_{ctm} = 2,14 f'_{ctd} = 2,14 \frac{N_p}{u_p d_m} \quad (17)$$

gdzie  $N_p$  to siła przebijająca równa sile w podporze, której wartość zależy od rozstawu i liczby podpór.

W warunkach budowy odpowiednie stwardnienie betonu, wymagane przy rozdeskowywaniu, najłatwiej jest potwierdzić poprzez zbadanie wytrzymałości betonu na ściskanie. Zgodnie z [10] rozwój wytrzymałości na rozciąganie w czasie  $t < 28$  dni w warunkach laboratoryjnych [11] opisuje zależność:

$$f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{ctm,28} \quad (18)$$

gdzie:  $f_{ctm,28}$  – średnia wytrzymałość na rozciąganie betonu w wieku 28 dni (normowa, odpowiednia dla projektowanej klasy betonu), a  $\beta_{cc}(t)$  jak w równ. (10).

Z porównania równ. (18) i równ. (9) wynika, że zgodnie z [1] w rozważaniach można przyjmować identyczną szybkość przyrostu wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie w czasie  $t < 28$  dni. Według [1,10] zależność między wytrzymałością betonu na rozciąganie i ściskanie można wyrazić funkcją:

$$f_{ctm} = 0,3 \sqrt[3]{(f_{ck})^2} \quad (19)$$

Wobec tego, znając wymaganą do rozformowania wytrzymałość betonu na rozciąganie, określoną według kryterium (15) lub (17), można ustalić odpowiadającą jej wytrzymałość na ściskanie z zależności (20), którą otrzymuje się poprzez przekształcenie równ. (19) i uwzględnieniu równ. (5):

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

Wartość współczynnika zmienności  $v$  należy przyjmować odpowiednią do klasy betonu, podobnie jak w równ. (5).

Ciąg dalszy w kolejnym numerze BTA

dr inż. Sławomir Biruk  
dr inż. Waldemar Budziński  
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