

# Wyznaczanie modułu sprężystości betonu przy ścisaniu

## *Determination of secant modulus of elasticity of concrete in compression*

DOI: 10.15199/33.2015.06.23

(Artykuł przeglądowy)

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zasady wyznaczania siecznego modułu sprężystości betonu przy ścisaniu opisane w normie PN-EN 12390-13:2014-02. Zapisy normowe opatrzone komentarzami i odniesieniami do literatury. Podano przykładowe wyniki modułu  $E_{C,S}$  wyznaczone dla betonu wirowanego.

**Słowa kluczowe:** beton, moduł sprężystości, badania.

**Abstract.** The paper presents testing rules of the secant modulus of elasticity of concrete in compression according to PN-EN 12390-13:2014-02. The guidelines from Eurocode were commented and referred to literature. The paper presents examples of the results of the  $E_{C,S}$  module designated for spun concrete.

**Keywords:** concrete, modulus of elasticity, tests.

5 lutego 2014 r. została zatwierdzona przez Prezesa Polskiego Komitetu Normalizacji, a 7 lutego 2014 r. opublikowana w wersji angielskiej norma PN-EN 12390-13:2014-02 *Badania betonu. Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ścisaniu* [1], określająca dwie metody (A i B) wyznaczania siecznego modułu sprężystości betonu przy ścisaniu na próbkach formowanych lub pobranych z konstrukcji. Metoda A pozwala na określenie początkowego  $E_{C,0}$  i ustabilizowanego  $E_{C,S}$  siecznego modułu sprężystości betonu, a metoda B tylko ustabilizowanego  $E_{C,S}$ . Wprowadzona norma [1] kończy okres pewnej dobrowolności w zakresie badania modułu sprężystości betonu [2, 5, 7] i zastępuje stosowaną dotychczas Instrukcję ITB nr 194/98 [2].

### Próbki pomiarowe i niezbędne urządzenia

Do oznaczania modułu sprężystości betonu przy ścisaniu należy stosować słupowe próbki formowane (walcowe lub prostopadłościennie) lub rdzenie walcowe pobrane z konstrukcji spełniające wymagania [3, 4]. Stosunek wysokości próbki  $h$  do średnicy  $d$  (szerokości przekroju) powinien wynosić  $2 \div 4$ , a średnica (szerokość) co najmniej  $3,5 D_{max}$  (średnicy najgrubszej frakcji kruszywa w betonie). Zaleca się, aby próbka miała kształt walca o średnicy podstawy  $d = 150$  mm i wysokości  $h = 300$  mm. W przypadku próbek rdzeniowych wymagania dotyczące wymiarów nie muszą być spełnione.

Przed zasadniczymi badaniami współczynnika sprężystości betonu należy określić średnią wytrzymałość słupową betonu na ścisanie  $f_{cm}$  (wytrzymałość w jednoosiowym stanie naprężeń) na próbkach towarzyszących, niezbędną do określenia górnego poziomu naprężenia w próbce  $\sigma_a = f_{cm}/3$  podczas realizacji cykli obciążeń próbki zasadniczej (dotychczas górny poziom naprężenia  $\sigma_a$  był określany na poziomie  $(0,3 \div 0,6) f_{cm}$  [5]). Próbki towarzyszące powinny mieć ten sam kształt i być wykonane z tego samego betonu co próbki użyte do badania modułu sprężystości. Norma [1] nie określa minimalnej liczby próbek towarzyszących (instrukcja ITB [2] sugeruje, aby były to co najmniej 3 próbki).

Badanie modułu sprężystości betonu należy zrealizować w maszynie wytrzymałościowej do prób ścisania klasy 1, spełniającej wymagania [6]. Zmiana naprężenia w betonie powinna odbywać się z prędkością  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s. Przyrządy minimum klasy 2 stosowane do pomiaru odkształceń betonu powinny mieć bazę pomiarową długości od  $2/3$  średnicy próbki (lub szerokości przekroju) do po-

łowy wysokości próbki (czujniki indukcyjne) i nie mniejszą niż trzykrotną średnicę kruszywa  $D_{max}$  (tensometry elektrooporowe) oraz być ustawione tak, aby baza pomiarowa znajdowała się w równej odległości od końców próbki. Co najmniej dwa przyrządy należy umieścić symetrycznie do osi próbki, natomiast próbkę z przyrządami pomiarowymi umieścić centralnie w maszynie wytrzymałościowej w celu realizacji osiowego ścisania.

Norma [1] nie precyzuje liczby przyrządów do pomiaru odkształceń. Należy się domyślać, że powinny być dwa, a najlepiej cztery w dwóch prostopadłych płaszczyznach pionowych. Zgodnie z instrukcją [2] w przypadku próbek prostopadłościennych zaleca się wykonanie pomiaru w osiach pionowych każdej ścianki próbki. W przypadku próbek walcowych można było realizować pomiary wzdłuż trzech linii rozmieszczonych na poboczniczy co  $120^\circ$  (co nie jest zgodne z [1]).

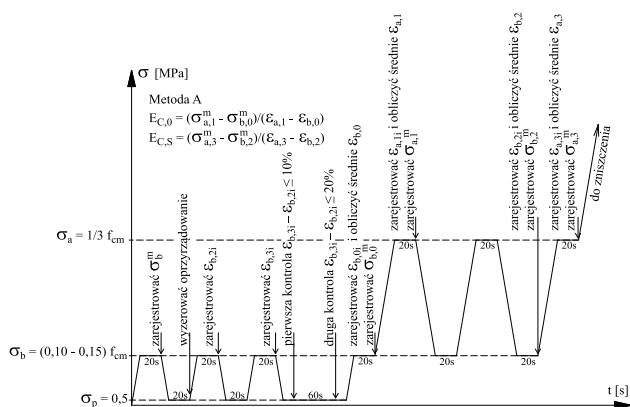
### Metoda A wyznaczania siecznego modułu sprężystości betonu

W metodzie A badania modułów  $E_{C,0}$  i  $E_{C,S}$  realizuje się najpierw trzy cykle obciążenia wstępnego do poziomu  $\sigma_b = (0,10 \div 0,15) f_{cm}$  (rysunek 1), a następnie cykle właściwe z górnym poziomem naprężenia  $\sigma_a = f_{cm}/3$ . Po trzech cyklach obciążenia wstępnego należy sprawdzić trwałość połączeń czujników pomiarowych (kontrola pierwsza) i ustawienia próbki (kontrola druga). Po pozytywnym wyniku kontroli wykonuje się dwa cykle obciążenie – odciążenie od poziomu dolnego  $\sigma_b = (0,10 \div 0,15) f_{cm}$  do górnego  $\sigma_a = f_{cm}/3$  (rysunek 1). Trzeci cykl przebiega przez poziom  $\sigma_a$  (z 20s zatrzymaniem) do zniszczenia próbki. Jeżeli wytrzymałość słupowa betonu na ścisanie w badanej próbce nie różni się od wytrzymałości próbek towarzyszących o więcej niż  $\pm 20\%$ , to wynik badania stanowi podstawę do obliczenia siecznych modułów sprężystości betonu  $E_{C,0}$  i  $E_{C,S}$  wg wzorów podanych na rysunku 1.

Podczas pierwszej kontroli należy sprawdzić, czy na każdej linii pomiarowej różnica odkształceń  $\epsilon_b$  zmierzonych przy poziomie naprężeń  $\sigma_b$  podczas drugiego i trzeciego cyklu nie jest większa niż  $\pm 10\%$ . Jeżeli jest większa, należy wstrzymać badanie, wyregulować przyrządy pomiarowe i rozpocząć badanie od nowa. Z kolei jeżeli nie ma możliwości obniżenia różnicy poniżej  $10\%$  po ponownym rozpoczęciu badania, to trzeba je zakończyć.

Podczas drugiego kontroli odchylenie odkształceń  $\epsilon_b$  na wszystkich liniach pomiarowych przy trzecim cyklu obciążenia wstępnego nie powinno różnić się od ich wartości średniej o więcej niż  $\pm 20\%$ . Jeśli warunek ten nie jest spełniony, należy ponownie wycentrować

<sup>1)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; e-mail: jaroslaw.michalek@pwr.edu.pl

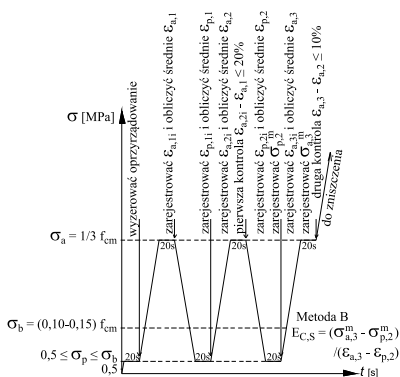


Rys. 1. Metoda A wyznaczania  $E_{C,0}$  i  $E_{C,S}$   
Fig. 1. The method A of  $E_{C,0}$  and  $E_{C,S}$  testing

próbkę i jeszcze raz rozpocząć badanie. W przypadku, gdy nie ma możliwości obniżenia różnicy pomiarów, należy zatrzymać badanie i próbkę odrzucić. Stąd tak ważne jest zagadnienie płaskości powierzchni górnej i dolnej próbki.

### Metoda B wyznaczania siecznego modułu sprężystości betonu

Metodę B stosuje się do wyznaczania siecznego, ustabilizowanego modułu sprężystości betonu  $E_{C,S}$ . Przeprowadza się tylko trzy cykle obciążenia od poziomu naprężeń wstępnych  $0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq (0,10 \div 0,15) f_{cm}$  do poziomu naprężeń górnych  $\sigma_a = f_{cm}/3$  (rysunek 2). Po drugim cyklu obciążenia i odciążenia należy wykonać pierwszą kontrolę ustabilizowania próbki. W trzecim cyklu obciążenia wykonuje się drugą kontrolę powtarzalności odczytów czujników pomiarowych odkształceń na poziomie naprężeń  $\sigma_a$ , a następnie próbkę obciąża do zniszczenia. Wytrzymałość słupowa betonu na ściskanie nie może się różnić o więcej niż  $\pm 20\%$  od wyniku badania próbek towarzyszących. Jeśli tak jest, to  $E_{C,S}$  oblicza się wg wzoru podanego na rysunku 2. W drugim cyklu obciążania próbki sprawdza się, czy odchylenie wartości odkształceń betonu przy poziomie naprężeń  $\sigma_a$  na każdej linii pomiarowej nie przekracza  $\pm 20\%$  wartości średniej. Jeśli różnica ta jest większa, należy ponownie wycentrować próbkę i jeszcze raz rozpocząć badanie. W przypadku gdy nie ma możliwości obniżenia tej różnicy, należy zatrzymać badanie i próbkę odrzucić jako źle przygotowaną do badań.



Rys. 2. Metoda B wyznaczania  $E_{C,S}$   
Fig. 2. The method B of  $E_{C,S}$  testing

Podczas drugiej kontroli (rysunek 2) należy wykazać, że różnica odczytów odkształceń betonu przy poziomie naprężeń  $\sigma_a$  na każdej linii pomiarowej między trzecim i drugim cyklem nie różni się o więcej niż  $\pm 10\%$ . Jeśli różnica odkształcenia jest większa, należy badanie zatrzymać, wyregulować przyrządy pomiarowe i rozpocząć badanie od początku. Jeśli nie ma możliwości obniżenia tej różnicy po ponownym rozpoczęciu badania, to należy dokończyć badanie, a uzyskaną różnicę odkształceń należy zamieścić w raporcie z badań.

Podczas drugiej kontroli (rysunek 2) należy wykazać, że różnica odczytów odkształceń betonu przy poziomie naprężeń  $\sigma_a$  na każdej linii pomiarowej między trzecim i drugim cyklem nie różni się o więcej niż  $\pm 10\%$ . Jeśli różnica odkształcenia jest większa, należy badanie zatrzymać, wyregulować przyrządy pomiarowe i rozpocząć badanie od początku. Jeśli nie ma możliwości obniżenia tej różnicy po ponownym rozpoczęciu badania, to należy dokończyć badanie, a uzyskaną różnicę odkształceń należy zamieścić w raporcie z badań.

### Przykładowe badania modułu sprężystości betonu wg [1] i [2]

Ustabilizowany moduł sprężystości  $E_{C,S}$  betonu wirowanego badano zgodnie z metodą B [1]. Badania przeprowadzono na próbkach pierścieniowych o średnicy zewnętrznej  $d = 150 \text{ mm}$  i wysokości  $h = 300 \text{ mm}$  z betonu stosowanego do produkcji żerdzi elektroenergetycznych w jednym z zakładów produkcyjnych na terenie Polski (zakład nr 4 – tabela). Uzyskane wyniki porównano z wynikami

#### Wyniki badań modułu sprężystości betonu wirowanego The results of Young's modulus test of spun concrete

Oznaczenie	Zakład 1 [2]	Zakład 2 [2]	Zakład 3 [2]	Zakład 4 [1]			
Seria 1	Seria 2	Seria 1	Seria 2	Seria 1			
$E_{cm,wir}$ [GPa]	44,78	43,15	35,41	35,78	33,44	33,28	37,43

z wcześniejszych badań zrealizowanych w latach 1995 – 1996 wg [2] w trzech zakładach produkcyjnych [7], zlokalizowanych w północnej, środkowej i południowej części kraju. We wszystkich zakładach do zagęszczania betonu klasy C40/50 stosowano wirówki rolkowe. W Zakładzie nr 1 i 3 w mieszance betonowej zastosowano płukane kruszywa naturalne, a w Zakładzie nr 2 kruszywa naturalne i frakcję  $8 \div 16 \text{ mm}$  kruszywa sjenitowego. W Zakładzie nr 4 użyto płukanego kruszywa naturalnego z niewielką domieszką frakcji  $8 \div 16 \text{ mm}$  kruszywa bazaltowego (20%).

### Podsumowanie

Wprowadzenie normy [1] ujednoliciła procedurę badania siecznego modułu sprężystości betonu przy ściskaniu na próbkach takich w  $d = 150 \text{ mm}$  i  $h = 300 \text{ mm}$ . Sprawne przeprowadzenie takich badań zależy od sposobu przygotowania powierzchni górnej i dolnej próbki gwarantujące jej osiowe ściskanie. Norma [1] wprowadziła pojęcie siecznego modułu początkowego  $E_{C,0}$  przy pierwszym obciążeniu i siecznego modułu ustabilizowanego  $E_{C,S}$  po trzech cyklach obciążania. Ustabilizowany sieczny moduł sprężystości  $E_{C,S}$  można uznać za średni moduł sprężystości betonu  $E_{cm}$ . Początkowy sieczny moduł sprężystości betonu  $E_{C,0}$  może być uwzględniany w obliczeniach strat doraźnych siły sprężającej i ugięcia początkowego elementu strunobetonowego w chwili wprowadzenia siły sprężającej.

Wyniki badań modułu sprężystości betonu w czterech zakładach zlokalizowanych w różnych częściach Polski wykazały istotny wpływ rodzaju zastosowanego kruszywa naturalnego na cechy odkształcalnościowe betonu wirowanego (tabela). Stosując zbliżone do siebie recepty, można osiągnąć o 35% większy moduł sprężystości betonu z kruszywem naturalnym z północnej Polski (Zakład nr 1) w stosunku do betonu z kruszywem z Polski południowej (Zakład nr 3). Wpływ metody określania modułu sprężystości betonu [1] jest niewielki (Zakład nr 2 i 4).

### Literatura

- [1] PN-EN 12390-13-2014-02 Badania betonu. Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu.
- [2] Brunarski L.: Instrukcja 194/98. Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1998.
- [3] PN-EN 12390-1: 2013-03 Badania betonu. Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form.
- [4] PN-EN 12504-1: 2011 Badania betonu w konstrukcjach. Część 1: Próbkę rdzeniowe. Pobieranie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie.
- [5] Nagrodzka-Godycka K.: Badanie właściwości betonu i żelbetu w warunkach laboratoryjnych, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1999.
- [6] PN-EN 12390-4: 2001 Badania betonu. Część 4: Wytrzymałość na ściskanie. Wymagania dla maszyn wytrzymałościowych.
- [7] Łodo A., Michałek J., Kubiak J.: Odkształcalność doraźna i wytrzymałość na ściskanie betonu w żerdziach wirowanych. Tom II: Konstrukcje betonowe, Materiały Budowlane. XLVI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław – Krynica 2000 r., s. 111 – 118.

Otrzymano 30.04.2015 r.