

Małgorzata ORZECZOWSKA\*  
Politechnika Śląska

## WPŁYW SZYBKOŚCI PRZYROSTU OBCIĄŻENIA NA CHARAKTERYSTYKĘ $\sigma - \varepsilon$ BETONU

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań trzech mieszanek betonowych poddanych różnym przyrostom szybkości obciążenia. Wraz ze wzrostem szybkości przyrostu obciążenia wytrzymałość betonu wzrastała, a ze zmniejszaniem malała. Badania wykazały wyraźne „pochylenie” wykresu  $\sigma - \varepsilon$  wraz ze zmniejszeniem szybkości przyrostu obciążenia, co skutkuje zmniejszeniem modułu sprężystości.

## INFLUENCE OF STRAIN RATE ON STRESS-STRAIN RELATIONSHIP IN CONCRETE

**Summary.** In this paper the result for three different concrete mixes subjected to different rates of loading are presented. The strength increases as the strain rate increase, and decreases with decrease of strain rate. Decrease of the loading rate causes the slope of  $\sigma - \varepsilon$  curve what influence the decrease in modul of elasticity.

### 1. Wstęp

Wytrzymałość betonu zależy od przyrostu szybkości obciążenia oraz czasu trwania obciążenia. Wytrzymałość betonu wzrasta wraz ze wzrostem szybkości przyrostu obciążenia, podczas gdy przy zmniejszeniu przyrostu szybkości obciążenia wytrzymałość betonu maleje (rys. 1).

Przy poddaniu betonu długotrwałym obciążeniom o dużej intensywności, po czasie zależnym od intensywności obciążenia zaobserwujemy zniszczenie. W tym artykule poruszony zostanie pierwszy czynnik spośród mających wpływ na wytrzymałość betonu, czyli przyrost szybkości obciążenia.

\* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Stanisław Majewski.

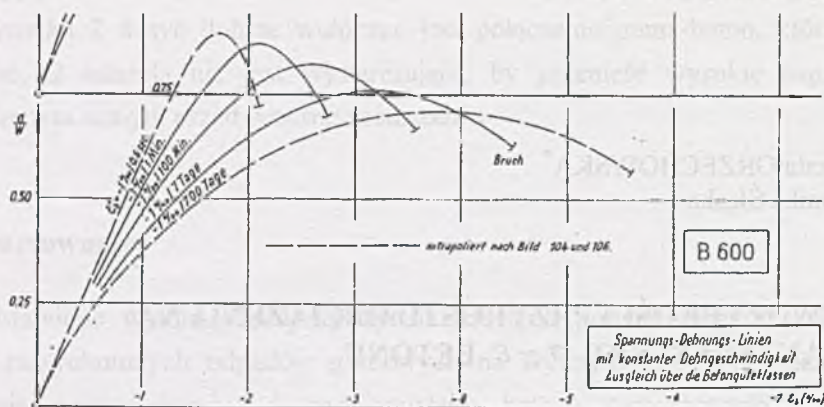
Rys. 1. Zależność  $\sigma$ - $\epsilon$  wg Rascha [1]

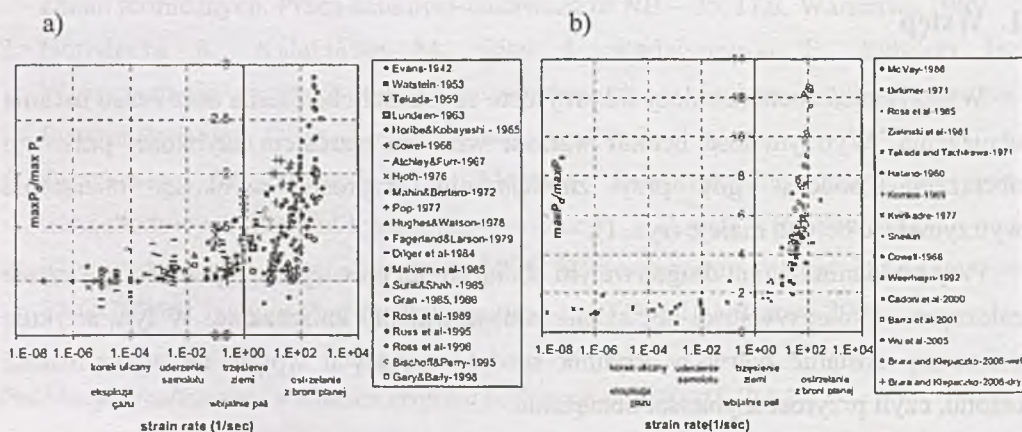
Fig. 1. Stress-strain relationship by Rasch [1]

Typowe badania wytrzymałości betonu na ściskanie prowadzone są przy szybkościach równych:

- wg ASTM C 39-93a – 0,14-0,34 MPa/s = 140-340 kPa/s [11];
- wg BS1881 part 116: 1983 0,2-0,4 MPa/s = 200-400 kPa/s [11];
- wg polskiej normy [12]  $500 \pm 100$  kPa/s.

Badania prowadzone przy innych szybkościach przyrostu obciążenia dotyczą głównie szybkości dynamicznych. Jest to zrozumiałe ze względu na szybkości wielu obciążeń występujących w rzeczywistości, np. trzęsień ziemi.

Cotsovos i Pavlović [4] zebrali dotychczasowe wyniki badań betonu poddanego ściskaniu i rozciąganiu przy różnych szybkościach przyrostu obciążenia.



Rys. 2. Zależność wytrzymałości betonu od szybkości przyrostu odkształcenia w jednoosiowym: a) ściskaniu; b) rozciąganiu [4, 9]

Fig. 2. Variation of load-carrying capacity with strain rate for concrete in uniaxial: a) compression; b) tension [4, 9]



Zaczerpnięty wykres (rys. 2) został uzupełniony wg [9] rzeczywistymi zagrożeniami dla konstrukcji, przypisanymi do danych szybkości przyrostu obciążenia.

Wolniejsze szybkości przyrostu obciążenia powinny być również tematem badań. Przykładem występującym w rzeczywistej konstrukcji może być analiza zapór wodnych podczas trzęsień ziemi, w których rysy rosną powoli przez wiele lat, zgodnie ze zmianami objętości i osiadaniem fundamentów [2].

## 2. Odpowiedź materiału na różne przyrosty szybkości obciążenia

Odpowiedź materiału, nie tylko betonu, na różne szybkości obciążenia występuje w trzech różnych efektach:

- pełzanie objętościowe materiału;
- zależność powiększania mikrorys od szybkości;
- wpływ wewnętrznych sił, które mogą znacząco zmienić stan naprężenia i odkształcenia materiału.

Zależnie od typu materiału i poziomu obciążenia, pierwszy, drugi lub trzeci efekt jest dominujący. Pełzanie jest kluczowym efektem w materiałach kruchych, takich jak beton, w których występuje zarysowanie i zniszczenie dla stosunkowo małych szybkości przyrostu obciążenia. Efekt pełzania jest pomijalny przy obciążeniach dynamicznych, gdzie dominują pozostałe dwa efekty [2, 3, 8].

Bażant i Li [2] podają dwa źródła pełzania zależnego od czasu, które doprowadza do zniszczenia: lepkosprężyste pełzanie objętościowe w fazie sprężystej i zależny od szybkości proces zerwania wiązań w części opadającej gałęzi wykresu  $\sigma$ - $\epsilon$ , który czyni prawo osłabienia zależnym od szybkości.

Zniszczenie dynamiczne jest bardziej skomplikowane, poza zależnością zerwania wiązań na powierzchni zewnętrznej próbki od szybkości przyrostu obciążenia, z powodu wpływów sił bezwładności w okolicy powierzchni zewnętrznej i propagacji fali, które odgrywają ważną rolę [2]. Jednakże wszystkie badania wykazują, że wolna woda odgrywa ważną rolę we właściwościach betonu poddanego obciążeniu dynamicznemu [6]. Stwierdzono, że powierzchniowe naprężenia wody w porach kapilarnych są główną przyczyną procesów zależnych od przyrostu szybkości obciążenia. W badaniach wykazano, że jedynie beton z relatywnie dużym stopniem saturacji jest wrażliwy na czynniki zależne od czasu. Kolejnym wnioskiem z badań było stwierdzenie, że efekty zależne od czasu nie zależą od stosunku  $w/c$  [10]. Wpływ wilgotności próbek na wytrzymałość został przebadany w 1996 roku przez Ross,

Tedesco i Huges [7]. Stwierdzili oni większy przyrost wytrzymałości dla dynamicznych szybkości próbek mokrych i półsuchych. Przy obciążeniach wolniejszych nie zauważyli różnicy, a przy szybkościach statycznych wytrzymałość mokrych i półsuchych próbek była wyższa niż suchych. Stąd właściwe sformułowanie procesów zależnych od przyrostu szybkości obciążenia ucieka się do fizycznego opisu efektu Stefana, który uzależnia zachowanie się wody w porach kapilarnych od szybkości przyrostu obciążenia [10].

Jak wiadomo, woda w betonie rozchodzi się w hydratyzowanym zaczynie cementowym (HCP), występującym w dwóch stanach: wody wolnej i wody chemicznie związanej. Ta druga jest integralną częścią HCP i nie zanika podczas wysychania, podczas gdy pierwsza rozchodzi się pomiędzy mikrorysami oraz kapilarami w HCP i będzie parować kiedy temperatura osiągnie  $100^{\circ}\text{C}$  [6]. Efekt Stefana dotyczy właśnie wody wolnej, która umieszczona pomiędzy dwoma powierzchniami tworzy film wodny o danej grubości i lepkości. Przy próbie rozdzielenia powierzchni siłą do nich prostopadłą, powstają siły lepkie, które są wprost proporcjonalnie do szybkości przyrostu obciążenia, którą chcemy je rozdzielić [5, 6, 10]. Można powiedzieć, że w betonie z dużą ilością wolnej wody im większa szybkość przyrostu obciążenia jest zadana, tym większe pojawiają się siły przeciwstawiające się, co zwiększa wytrzymałość betonu. W suchym betonie z małą ilością wolnej wody wpływ będzie mniejszy. Efekt Stefana ma większy wpływ na wytrzymałość niż na moduł sprężystości, ponieważ w przypadku późniejszych parametrów kruszywo, które gra ważną rolę, nie podlega efektowi Stefana, dopóki nie jest porowate i mokre [5]. Zheng i Li [6] w 2004 roku stwierdzili, że to zjawisko wyjaśnia przyrost wytrzymałości pod obciążeniem dynamicznym pojedynczej rysy, mającej ogromne znaczenie przy rozciąganiu, ale nie jest wystarczającym wytłumaczeniem w przypadku ściskania.

### 3. Badania własne

#### 3.1. Szybkości przyrostu obciążenia

Niewiele badań zostało przeprowadzonych przy wolniejszych szybkościach przyrostu obciążenia, co widać na rys. 2a. Z tego powodu przyjęto zakres badanych szybkości przyrostu naprężenia w granicach:  $2,8 \text{ kPa/s} \div 2829 \text{ kPa/s}$ . Założono statyczną szybkość przyrostu naprężenia równą  $283 \text{ kPa/s}$ .



### 3.2. Próbkki i stanowisko badawcze

Przebadano trzy typy mieszanki betonowej o składach:

Tabela 1

Składy mieszanki betonowej

	A	B	C
Cement CEM I 32,5R [kg/m <sup>3</sup> ]	402	429	452
Woda [l/m <sup>3</sup> ]	225	174	178
Piasek 0-2mm [kg/m <sup>3</sup> ]	565	584	582
Kruszywo otoczakowe 2-16mm [kg/m <sup>3</sup> ]	1092	1186	1156
Powietrze 2%	20	20	20
w/c	0,56	0,40	0,39

Badania przeprowadzono na próbkach cylindrycznych o wysokości równej 300 mm i średnicy 150 mm. Beton był układany w formach warstwami, które były wibrowane każdorazowo po 40 s. Po jednym dniu próbki były rozformowywane i przez 7 dni trzymane pod folią w warunkach wysokiej wilgotności. Następnie, do czasu badania, próbki były przechowywane w temperaturze  $t = 18 \pm 2^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej powietrza  $70 \pm 5\%$ . Wszystkie badania przeprowadzono na próbkach 28-dniowych.

Badania były prowadzone w prasie hydraulicznej z możliwością sterowania szybkością przykładanych obciążeń, w zakresie obciążeń od 0,01 kN/s do 100 kN/s. Dla badanych próbek skutkuje to możliwą szybkością przyrastania naprężeń mieszczącą się w zakresie: 0,57 kPa/s÷5659 kPa/s.

Odkształcenia były mierzone za pomocą dwóch tensometrów elektrooporowych (pionowego i poziomego) umieszczonych na poboczniczy próbki co  $180^\circ$ . Prowadzony był ciągły odczyt odkształceń co 0,2 s lub 0,5 s, w zależności od zadanego poziomu szybkości przyrostu obciążenia.

### 4. Wyniki i dyskusja

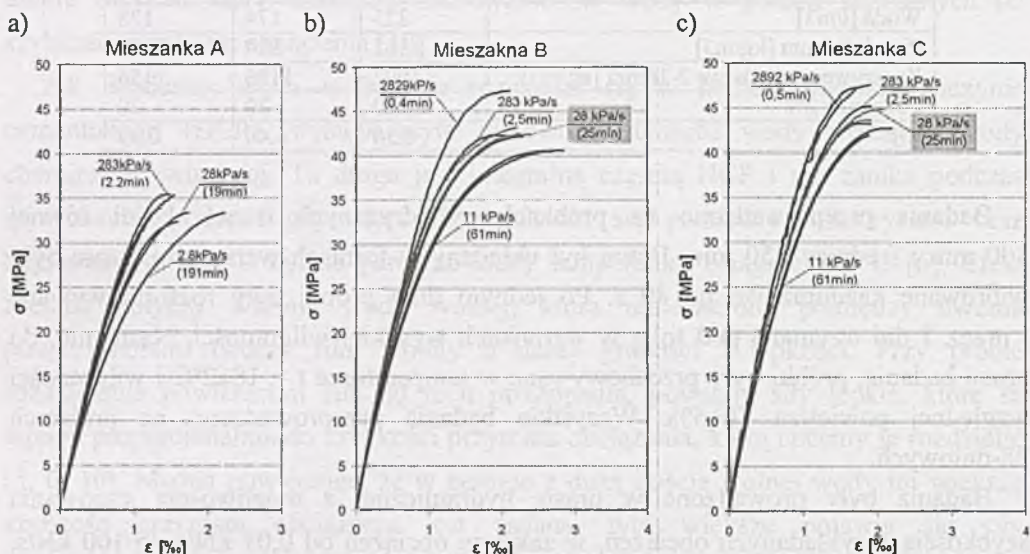
Przebadano łącznie 64 próbki z trzech mieszanek betonowych:

Tabela 2

Liczba przebadanych próbek wykonanych z poszczególnych mieszanek

szybkość przyrostu obciążenia	Mieszanka		
	A	B	C
statyczna	9	9	6
10 razy mniejsza od statycznej	6	6	6
25 razy mniejsza od statycznej		6	3
100 razy mniejsza od statycznej	3		

Wraz ze zmniejszeniem szybkości przyrostu naprężenia wytrzymałość betonu na ściskanie malała, a jego odkształcenia rosły. Na rys. 3 zaprezentowano wybrane wyniki badań. Przy wzroście szybkości naprężenia obserwowano wzrost wytrzymałości.

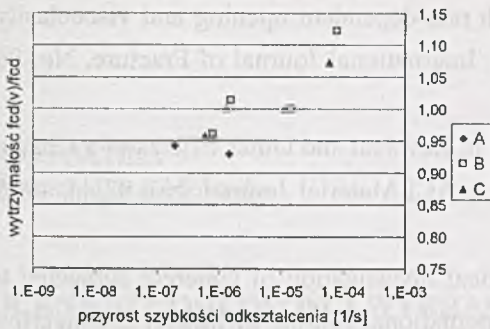


Rys. 3. Zależności  $\sigma$ - $\epsilon$  dla mieszanek A, B i C dla różnych przyrostów szybkości naprężenia  
Fig. 3. Stress-strain relationship for mixes A, B i C for different stress rates

Dla przebadanych betonów o wytrzymałości powyżej 40 MPa i  $w/c = 0,4$  (mieszanka B i C) zaobserwowano niewielkie różnice w przebiegu wykresu  $\sigma$ - $\epsilon$  dla szybkości naprężeń 283 kN/s i 28 kN/s. Jednak ta sama szybkość dla betonu o niższej wytrzymałości (mieszanka A) i większym  $w/c$  skutkowała zmniejszeniem wytrzymałości aż o 7%. Wraz ze zmniejszaniem szybkości przyrostu obciążenia można zauważyć pochylanie się wykresu  $\sigma$ - $\epsilon$ , co skutkuje zmniejszeniem modułu sprężystości.

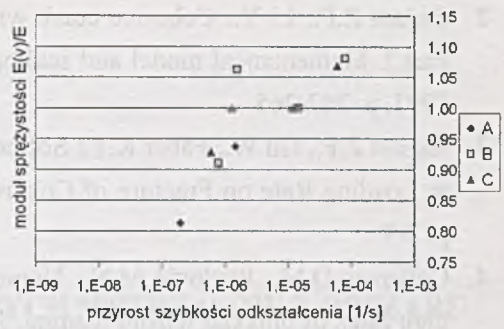
Na rys. 4 i rys. 5 wyraźnie widać zmniejszenie wytrzymałości i modułu sprężystości wraz z zmniejszeniem szybkości przyrostu odkształcenia. Zaobserwowano większą redukcję modułu sprężystości niż wytrzymałości. Przy najmniejszej z przebadanych szybkości przyrostu odkształcenia otrzymano tylko 80% statycznego modułu sprężystości.





Rys. 4. Zależność wytrzymałości na ściskanie od przyrostu szybkości odkształcenia

Fig. 4. Load-carrying capacity with strain rate ratio for concrete in compression



Rys. 5. Zależność modułu sprężystości od przyrostu szybkości odkształcenia

Fig. 5. Modul of elasticity with strain rate ratio for concrete in compression

## 5. Wnioski

Podczas badań wraz ze zmniejszeniem szybkości przyrostu obciążenia zaobserwowano:

- redukcję wytrzymałości betonu na ściskanie (do 93%);
- pochylenie się wykresu  $\sigma$ - $\varepsilon$ ;
- znaczną redukcję modułu sprężystości (nawet do 80%);
- wzrost odkształceń.

Wzrost szybkości przyrostu obciążenia powodował wzrost wytrzymałości, wzrost modułu sprężystości oraz zmniejszenie odkształceń.

Badania betonu poddanego wolnym przyrostom szybkości obciążenia pozwalają na określenie wytrzymałości trwałej betonu. Przy bardzo małych szybkościach obciążenie wytrzymałość może osiągnąć nawet 75% wytrzymałości betonu badanego statycznie. Tak więc uwzględnienie wpływu obciążeń długotrwałych jest niezmiernie ważne przy długotrwałej analizie konstrukcji betonowych. Przeprowadzone badania posłużą do numerycznego sformułowania badanych zjawisk.

## BIBLIOGRAFIA

1. Rasch Ch.: Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons und Spannungsverteilung in der Biegedruckzone bei konstanter Dehngeschwindigkeit. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, heft 154, Berlin 1962.

2. Bažant Z.P., Li Y.: Cohesive crack with rate-dependent opening and viscoelasticity. Part I. Mathematical model and scaling. *International Journal of Fracture*, No. 86, 1997, p. 247-265.
3. Bažant Z.P., Gu W., Faber K.T.: Softening Reversal and Other Effects of a Change in Loading Rate on Fracture of Concrete. *ACI Material Journal*, No. 92(1), 1995, p. 3-9.
4. Cotsovos D.M., Pavlović M.N.: Numerical investigation of concrete subjected to high rates of uniaxial tensile loading. *International Journal of Impact Engineering*, No. 35, 2008, p. 319-335.
5. Rossi P.: Strain rate effects in concrete structures: the LCPC experience. *Materials and Structures*, March 1997, p. 54-62.
6. Zheng D., Li Q.: An explanation for rate effect of concrete strength based on fracture toughness including free water viscosity. *Engineering Fracture Mechanics*, No. 71, 2004, p. 2319-2327.
7. Ross A., Jerome D.M., Tedesco J.W., Hughes M.L.: Moisture and strain rate effects on concrete strength. *ACI Material Journal*, No. 96, 1996, p. 293-300.
8. Ožbolt J., Rah K.K., Meštrović D.: Influence of loading rate on concrete cone failure. *International Journal of Fracture*, No. 139, 2006, p. 239-252.
9. Ross A., Tedesco J.W., Kunnen S.T.: Effects of strain rate on concrete strength. *ACI Material Journal*, No. 92, 1995, p. 37-47.
10. Pedersen R.R., Simone A., Sluys L.J.: An analysis of dynamic fracture in concrete with a continuum visco-elastic visco-plastic damage model. *Engineering Fracture Mechanics*, No. 75, 2008, p. 3782-3805.
11. Neville A.M.: Właściwości betonu. *Polski Cement*, Kraków 2000, s. 295-300, 467-500.
12. PN-88/B-06250 „Beton zwykły”.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Maria Kamińska