

# Wpływ rodzaju kruszywa grubego na odkształcalność betonów zwykłych

Dr hab. inż. Wojciech Piasta, Politechnika Świętokrzyska, dr inż. Waldemar Budzyński, dr inż. Jacek Góra, Politechnika Lubelska

## 1. Wprowadzenie

Wraz z postępem procesu twardnienia i wzrostem wytrzymałości, zaczyn i beton wykazują coraz mniejsze odkształcenia plastyczne i stają się coraz bardziej sprężyste. Przyrost wartości modułu sprężystości zaczynu i betonu w czasie jest bardzo podobny do zmian wytrzymałości. Wśród czynników o największym znaczeniu dla sprężystości zaczynu dominują stosunek w/c i stopień hydratacji cementu, czyli podstawowe wielkości decydujące o porowatości i mikrostrukturze porów, od których w sposób bezpośredni zależy wytrzymałość.

Choć w betonie znaczenie tych czynników jest niepodważalne i pierwszorzędne, to bardzo istotny wpływ na odkształcenia i moduł sprężystości betonu ma kruszywo grube. Zależność odkształceń betonu pod obciążeniem (podobnie jak i skurczu) od kruszywa ma szeroki zakres. Czynnikiem wpływu są właściwości kruszywa rozumianego jako wypełniacz, a wśród nich kształt i wielkość ziaren, ich tekstura, skład ziarnowy i stosunek objętości kruszywa grubego do objętości betonu. Decydujące są ponadto właściwości samego materiału, tj. moduł sprężystości i wytrzymałość skały, struktura skały, czy, w odniesieniu do ziaren kruszywa z tej skały, wskaźnik rozkruszenia.

Z uwagi na wartość odkształceń i modułu sprężystości betonu należy dodatkowo podkreślić znaczenie przyczepności ziaren kruszywa grubego do zaczynu cementowego. Oprócz kształtu i wielkości ziaren, przyczepność znacząco zależy od składu mineralnego wpływającego na właściwości powierzchniowe ziaren, ale także na reaktywność minerałów z zaczynem cementowym w warstwie kontaktowej, która jest najstabsza w całej mikrostrukturze betonu.

Kruszywa do betonów zwykłych i o wysokiej wytrzymałości są liniowo-sprężyste. Natomiast stwardniały zaczyn cementowy jest materiałem lepkosprężystym. Odkształcenia powodowane przez zmiany zawartości wody w zaczynie są ograniczane przez kruszywo, tworząc złożony stan naprężeń wewnętrznych. Konsekwencją skurczu i pęcznienia dojrzewającego betonu jest powstanie mikrorys w warstwie kontaktowej kruszywo-zaczyn, od których rozpoczyna się niszczenie podczas obciążenia. Krzywa  $\sigma$ - $\epsilon$  kruszywa ma w całym zakresie naprężeń

charakter liniowy, aż do zniszczenia. Odkształcenia zaczynu są wprost proporcjonalne do naprężeń równych 90–95% wytrzymałości. Natomiast krzywa odkształcenia betonu nie ma charakteru liniowego, ponieważ różnice w odkształcalności zaczynu i kruszywa wywołują koncentrację naprężeń w słabej warstwie kontaktowej, która ulega postępującemu pękaniu [1, 2, 3, 4].

## 2. Charakterystyka badanych betonów

Badaniom poddano 8 betonów zwykłych sklasyfikowanych w 2 grupach w zależności od wartości w/c. Przyjęto dwie wartości: w/c = 0,70 i w/c = 0,58. W każdej grupie betony wykonywano z użyciem czterech różnych kruszyw grubych 2÷16 mm. Zastosowano 2 kruszywa ze skał magmowych: grys bazaltowy z kopalni Gracze (B), grys granitowy z Granicznej (G) oraz 2 kruszywa ze skał osadowych: grys dolomitowy z Laskowej (D), naturalne otoczakowe z Suwałk (O). Jako kruszywo drobne stosowano piasek naturalny płukany 0÷2 mm z Suwałk. We wszystkich betonach zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R. W każdej grupie betonów przyjęto zasadę zachowania tej samej objętości kruszywa grubego. Aby zawartość objętościowa poszczególnych frakcji kruszywa w porównywanych betonach (w zakresie każdej grupy) była taka sama, uwzględniono różne gęstości objętościowe kruszyw. Punkt piaskowy stosu okruszowego, wyrażony objętościowo, w każdym przypadku wynosił  $37 \pm 1\%$ . Wskaźnik konsystencji mieszank betonowych, oznaczony metodą stożka opadowego, wynosił  $10 \pm 3$  cm, co odpowiada klasom konsystencji S2÷S3, zgodnie z [1]. Zawartość powietrza w mieszankach betonowych, oznaczona metodą ciśnieniową, mieściła się w granicach  $1,8 \pm 0,1\%$ . Receptury badanych betonów podano w tabelach 1 i 2.

Z każdego betonu wykonano 8 próbek walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm (5 przeznaczono do badania wytrzymałości na ściskanie, 3 do badania właściwości odkształceniowych betonu). Próbkę zbadano po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych. Górne powierzchnie próbek oszlifowano do równoległości podstaw. Przy określaniu cech odkształceniowych betonu (modułu sprężystości, współczynnika Poisson'a, zależności naprężenie-odkształ-

**Tabela 1.** Skład mieszanek betonów przy  $w/c = 0,70$

Składniki betonów $w/c = 0,70$	Oznaczenie betonu (rodzaj kruszywa grubego)			
	B070-B (bazalt)	B070-G (granit)	B070-D (dolomit)	B070-O (otoczek)
Cement $kg/m^3$	260	260	260	260
Piasek $kg/m^3$	697	697	697	697
Kruszywo grube $kg/m^3$	1334	1221	1303	1221
Woda $dm^3/m^3$	182	182	182	182

**Tabela 2.** Skład mieszanek betonów przy  $w/c = 0,58$

Składniki betonów $w/c = 0,58$	Oznaczenie betonu (rodzaj kruszywa grubego)			
	B070-B (bazalt)	B058-G (granit)	B058-D (dolomit)	B058-O (otoczek)
Cement $kg/m^3$	325	325	325	325
Piasek $kg/m^3$	676	676	676	676
Kruszywo grube $kg/m^3$	1274	1166	1245	1166
Woda $dm^3/m^3$	189	189	189	189

cenie) do pomiaru odkształceń stosowano tensometry elektrooporowe. W pomiarach wielkości  $E_c$  i  $v_c$  przyjęto zakres od 0,5 MPa do 0,4  $f_{cm}$ , na podstawie wartości maksymalnych naprężeń przy pomiarze modułu sprężystości według PN-EN 1992-1-1:2008 [5]. Badania przeprowadzono w Laboratorium Budownictwa Politechniki Lubelskiej za pomocą maszyny wytrzymałościowej ADVANTEST 9 sterowanej komputerowo (gwarantuje to m.in. utrzymanie stałego przyrostu naprężenia oraz odpowiednią częstość wykonywania odczytów).

### 3. Wyniki badań i ich analiza

#### 3.1. Moduł sprężystości i współczynnik Poissona

Wyniki badań zamieszczono w tabelach 3 i 4. Podano wartości średnie wytrzymałości na ściskanie  $f_{cm}$ , odkształceń granicznych przy maksymalnym naprężeniu ściskającym  $\epsilon_{c1,m}$ , współczynników odkształcenia poprzecznego  $v_{cm}$  (Poissona) oraz modułów sprężystości  $E_{cm}$ . W tabelach zamieszczono również informacje dotyczące klas zbadanych betonów, na podstawie kryteriów zgodności wg PN-EN 206-1:2003 [6], a także normowe wartości  $\epsilon_{c1,PN}$ ,  $v_{c,PN}$ ,  $E_{cm,PN}$ , odpowiadające klasom poszczególnych betonów.

Zachowując stały objętościowy skład betonów o  $w/c = 0,70$  i zmieniając jedynie kruszywo grube osiągnięto duże różnice w wytrzymałościach betonów na ściskanie i jeszcze większe w modułach sprężystości (tab. 3). Najlepsze właściwości osiągnął beton z kruszywem dolomitowym, natomiast najgorsze z kruszywem granitowym. Różnica w modułach sprężystości była nawet większa niż 30%. Dobre właściwości odkształceniowe wykazał także beton z kruszywem bazaltowym, jego moduł sprężystości był większy o ponad 20% niż betonu z kruszywem granitowym i o prawie 15% niż betonu

z kruszywem otoczkowym. Wyniki badań laboratoryjnych wykazały, że tylko beton z kruszywem dolomitowym osiągnął wartość normową modułu sprężystości. Pozostałe betony miały moduły sprężystości mniejsze niż wartości normowe, w tym także, co należy szczególnie podkreślić, beton z kruszywem bazaltowym, gdyż w tym przypadku normową wartość modułu należy zwiększyć o 20% [5].

Największa wartość współczynnika Poissona (stosunku odkształcenia poprzecznego do podłużnego odkształcenia sprężystego) betonu z kruszywem dolomitowym wynika z małego podłużnego odkształcenia sprężystego tego betonu. Natomiast w przypadku betonu z kruszywem granitowym, małą wartość współczynnika  $v_{cm}$  należy wiązać z dużym podłużnym odkształceniem sprężystym tego betonu.

**Tabela 3.** Wyniki badań betonów przy  $w/c = 0,70$

Właściwości	Oznaczenie betonów			
	B070-B (bazalt)	B070-G (granit)	B070-D (dolomit)	B070-O (otoczek)
$f_{cm}$ , MPa	34,5	28,7	36,1	32,0
$\epsilon_{c1,m}$ , ‰	2,13	2,44	2,06	2,09
$v_{cm}$	0,19	0,17	0,22	0,20
$E_{cm}$ , GPa	30,9	24,0	33,9	26,9
Klasa wytrzymałości betonu na ściskanie	C30/37	C20/25	C30/37	C25/30
$\epsilon_{c1,PN}$ , ‰	2,20	2,00	2,20	2,10
$v_{c,PN}$	0,20	0,20	0,20	0,20
$E_{cm,PN}$ , GPa	32,0/38,4 <sup>*)</sup>	30,0	32,0	31,0

<sup>\*)</sup> zgodnie z PN-EN 1992-1-1:2008 wartości  $E_{cm}$  należy zwiększyć o 20% dla kruszywa bazaltowego

Zróżnicowane były także wyniki badań właściwości odkształceniowych i wytrzymałości betonów o  $w/c = 0,58$  (tab. 4). Zaskakująco niską wartość modułu sprężystości wykazał beton z kruszywem granitowym, która była niższa, podobnie jak w przypadku  $w/c = 0,70$ , aż o 10 GPa w odniesieniu do betonów z kruszywem bazaltowym i dolomitowym. Wyjątkowo moduły tych betonów były w przybliżeniu równe i wynosiły około 35 GPa, co w przypadku kruszywa dolomitowego jest zgodne z wartością normową, a dla kruszywa bazaltowego istotnie mniejsze od wartości normowej. Natomiast beton z kruszywem otoczkowym osiągnął współczynnik sprężystości o wartości pośredniej wynoszącej 31 GPa, a więc prawie o 10% mniej niż wartość normowa (34 GPa). Analizując wartości modułu sprężystości betonów z poszczególnymi kruszywami, należy także wziąć pod uwagę ich różne wytrzymałości na ściskanie, które jak wykazały wyniki badań pozostają w tej samej wzajemnej relacji, przy obu stosunkach  $w/c$ . Przykładowo, przy  $w/c = 0,58$ , klasa wytrzymałości betonów z kruszywem bazaltowym i dolomitowym wyniosła C40/50, otoczkowym C35/45, a z granitowym C30/37.

Ogólnie biorąc, wartości współczynnika Poissona badanych betonów były zgodne z wartościami normowymi. Jedynie, przy obydwu wartościach w/c, współczynnik odkształcenia poprzecznego betonu z kruszywem granitowym miał wartość niższą (0,17 i 0,18), co wynikało z dużej wartości odkształceń podłużnych.

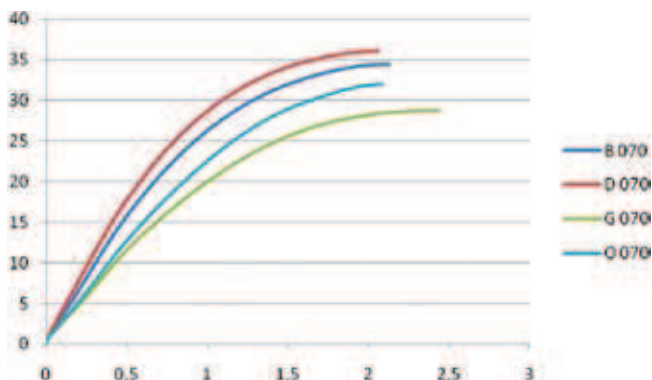
**Tabela 4.** Wyniki badań betonów przy w/c = 0,58

Właściwości	Oznaczenie betonów			
	B058-B (bazalt)	B058-G (granit)	B058-D (dolomit)	B058-O (otoczek)
$f_{cm}$ , MPa	47,5	36,9	44,9	41,8
$\epsilon_{c1m}$ , ‰	2,22	2,48	2,10	2,12
$\nu_{cm}$	0,20	0,18	0,21	0,20
$E_{cm}$ , GPa	34,8	25,0	35,3	31,0
Klasa wytrzymałości betonu na ściskanie	C40/50	C30/37	C40/50	C35/45
$\epsilon_{c1,PN}$ , ‰	2,30	2,20	2,30	2,25
$\nu_{c,PN}$	0,20	0,20	0,20	0,20
$E_{c,PN}$ , GPa	35,0/42,0*)	32,0	35,0	34,0

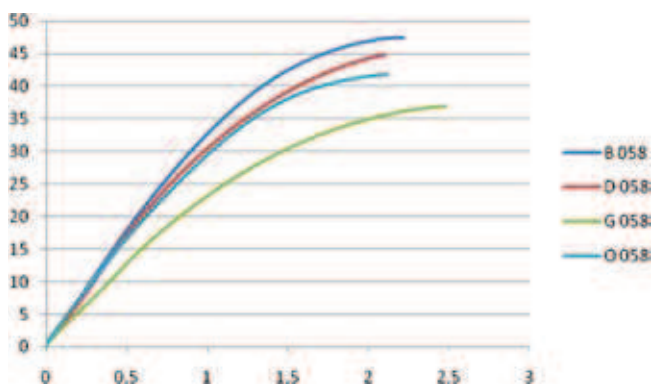
\*) zgodnie z PN-EN 1992-1-1:2008 wartości  $E_{cm}$  należy zwiększyć o 20% dla kruszywa bazaltowego

### 3.2. Odkształcenia pod obciążeniem doraźnym

Wyniki badań odkształceń betonów o w/c = 0,70 i 0,58 pod ściskającym obciążeniem doraźnym, przedstawione na krzywych  $\sigma-\epsilon$  (rys. 1 i 2), wyraźnie wskazują na dużo większe odkształcenia betonu z kruszywem granitowym, niż betonów z kruszywem dolomitowym i bazaltowym, a nawet betonu z kruszywem otoczkowym – znanego z dużych odkształceń doraźnych i długotrwałych. Z dużej odkształcalności betonu z kruszywem granitowym w całym zakresie naprężeń, wynika mała wartość omawianego wcześniej modułu sprężystości, a także bardzo duża wartość odkształcenia granicznego  $\epsilon_{c1}$ , która przy obydwu w/c była znacząco większa od wartości odkształceń pozostałych betonów oraz od wartości normowej o ponad 20%



**Rys. 1.** Zależności  $\sigma-\epsilon$  przy doraźnym, jednoosiowym ściskaniu betonów o w/c = 0,70 z różnymi kruszywami (wartości naprężeń na osi Y w MPa, a odkształceń na osi X w ‰)



**Rys. 2.** Zależności  $\sigma-\epsilon$  przy doraźnym, jednoosiowym ściskaniu betonów o w/c = 0,58 z różnymi kruszywami (wartości naprężeń na osi Y w MPa, a odkształceń na osi X w ‰)

(tab. 3 i 4). Zupełnie inne było zachowanie się, pod obciążeniem ściskającym, betonów z kruszywem dolomitowym i bazaltowym. W całym zakresie naprężeń wartości ich odkształceń były blisko podobne i najmniejsze wśród badanych betonów, mimo największych naprężeń niszczących. Wartość odkształceń końcowych betonów o w/c = 0,70 i 0,58 z kruszywem dolomitowym, była najmniejsza w porównaniu z pozostałymi betonami, a także mniejsza niż wartości normowe.

Analizując uzyskane w badaniach zależności  $\sigma-\epsilon$  (rys. 1 i 2) stwierdzono, że największą odkształcalnością pod obciążeniem doraźnym, przy obydwu wartościach w/c, charakteryzują się betony z kruszywem granitowym. Ponadto należy zwrócić uwagę na dużo większy zakres prostoliniowej zależności, tj. w większym zakresie naprężeń w przypadku betonów o w/c = 0,58. Wynika to nie tylko z większej wytrzymałości betonów o w/c = 0,58, ale przede wszystkim z mocniejszej warstwy kontaktowej i większego poziomu naprężeń krytycznych [3, 4].

### 4. Dyskusja wyników badań

Wyniki badań wykazały najkorzystniejszy wpływ kruszywa dolomitowego i bazaltowego na wytrzymałość i odkształcalność doraźną badanych betonów. Należy uznać, że nie występuje praktyczna różnica pomiędzy wartościami wytrzymałości na ściskanie betonów z kruszywami dolomitowym i bazaltowym. Można jedynie mówić o korzystniejszym wpływie kruszywa dolomitowego niż bazaltowego na moduł sprężystości betonu o w/c = 0,70 (różnica wynosi prawie 10%). Natomiast można jednoznacznie stwierdzić negatywny wpływ kruszywa granitowego na wytrzymałość i moduł sprężystości betonów.

Analizując wytrzymałość i moduł sprężystości betonów z czterema kruszywami, należy zauważyć, że zmniejszenie stosunku w/c z 0,70 do 0,58 spowodowało wzrost wytrzymałości na ściskanie betonów średnio o 31%

(w przypadku bazaltu – 38%, dolomitu – 24%, granitu – 29%, otoczaka – 31%) oraz wzrost modułu sprężystości średnio o 9% (bazaltu – 12%, dolomitu – 4%, granitu – 4%, otoczaka – 16%). Natomiast maksymalna różnica w wartościach modułów sprężystości spowodowana mniejszym przyrostem (średnio o 9%) modułu sprężystości od przyrostu (średnio o 31%) wytrzymałości na ściskanie pod wpływem zmniejszenia stosunku w/c niż zróżnicowanie wartości tych właściwości przez rodzaj zastosowanego kruszywa grubego. Czy świadczy to o większym uzależnieniu modułu sprężystości od rodzaju kruszywa, trudno ocenić, czy nie równie dużym jak w przypadku wytrzymałości. Można także wnioskować o mniejszym wpływie stosunku w/c na moduł sprężystości niż na wytrzymałość betonu na ściskanie.

Zastanawiające pozostaje, dlaczego wartości modułu sprężystości betonu podawane w normie PN-EN 1992-1-1:2008 są znacząco, nawet o ponad 20% (beton z kruszywem granitowym), wyższe niż wyniki z badań (tabela 3 i 4) aż 6 na 8 badanych betonów, w tym również betonu z kruszywem bazaltowym, a tylko w 1 przypadku mniejsze – beton z kruszywem dolomitowym przy w/c = 0,70. Jedynie beton z kruszywem dolomitowym przy obydwu wartościach w/c osiągnął średnią wartość modułu sprężystości nie mniejszą niż podano w normie. Biorąc pod uwagę, że betony zostały wykonane z dobrej i bardzo dobrej jakości kruszyw o starannie dobranym stosie okruszowym, powyższe porównanie sugeruje, że wartości normowe modułów sprężystości są zawyżone.

Z punktu widzenia nauki istotne jest wyjaśnienie, co jest przyczyną tak dużej różnicy pomiędzy wartościami modułu sprężystości, jak również wytrzymałości betonów z kruszywem granitowym, w porównaniu do betonów z kruszywem bazaltowym i dolomitowym. Dużo lepsze właściwości kruszywa bazaltowego niż kruszywa granitowego (będące wynikiem m.in. wyższego modułu sprężystości i wytrzymałości skały bazaltowej, czy znacznie mniejszej wartości wskaźnika rozkruszenia w przypadku kruszywa bazaltowego) pozwalają częściowo wyjaśnić przyczynę zróżnicowania tych właściwości obu betonów z kruszyw ze skał wulkanicznych [7].

Natomiast trudno jest stwierdzić przyczynę różnic we właściwościach betonu z kruszywa granitowego i dolomitowego ze względu na podobne właściwości techniczne obu skał i kruszyw, aczkolwiek wyraźne różnice występują w strukturze tych skał (granit – struktura średnio-

lub grubokrystaliczna, natomiast dolomit – zwarta/zbita). Bardziej niejasna pozostaje przyczyna braku różnicy w badanych właściwościach mechanicznych betonów z kruszywa dolomitowego i bazaltowego.

## 5. Wnioski

W obu grupach betonów (o tym samym w/c) stwierdzono istotny wpływ rodzaju kruszywa grubego na badane cechy odkształceniowe betonów zwykłych.

W badaniach jednoznacznie wykazano najgorsze właściwości odkształceniowe (moduł sprężystości  $E_{cm}$ , odkształcenie graniczne  $\epsilon_{c1}$  oraz zależność  $\sigma-\epsilon$ ) w przypadku betonów z kruszywem granitowym.

W przypadku betonów z kruszywami bazaltowym, granitowym oraz otoczkowym stwierdzono istotne zawyżenie normowych wartości  $E_{cm,PN}$ . Biorąc pod uwagę wyniki badań betonów z kruszywem bazaltowym, zalecane w normie zwiększenie modułu  $E_{cm,PN}$  o 20%, wydaje się całkowicie niecelowe.

Uwzględniając dotychczasowe wyniki [8, 9, 10] oraz prezentowane tu wyniki badań własnych odkształcalności betonów z rodzimymi kruszywami granitowymi, należy rozważyć wprowadzenie do załącznika krajowego współczynnika zmniejszającego normowe wartości  $E_{cm,PN}$  dla betonów z kruszywem granitowym.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Godycki-Ćwirko T., Mechanika betonu. Arkady, Warszawa 1982.
- [2] Roy D. M., Langton C. A.: Morphology and Microstructure of Cement Paste-Rock Interfacial Regions. 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris 1980
- [3] Monteiro P. J. M., Mehta P. K., Interaction between Carbonate Rock and Cement Paste Interface. Cement and Concrete Research, Vol. 16/1986
- [4] Hoła J., Naprężenia inicjujące i krytyczne a destrukcja naprężeniowa w betonie ściskany. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [5] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [6] PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [7] Piasta J., Piasta W., Rodzaje i znaczenie kruszywa w betonie. XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń 2002
- [8] Lewicki B. (red.), Komentarz naukowy do PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Tom I. ITB 2003
- [9] Góra J., Wpływ kruszyw węglanowych, granitowych i bazaltowych na doraźne właściwości mechaniczne i odkształceniowe betonów zwykłych oraz wysokowartościowych. Praca doktorska. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2005
- [10] Piasta J., Technologia betonów z kruszyw łamanych. Arkady 1974

**Prenumerata 214,20 zł**  
**ulgowa tylko 107,10 zł**

[www.przegladbudowlany.pl](http://www.przegladbudowlany.pl)