

Andrzej Szumiński, Robert Klisowski**

WPŁYW WIEKU PRÓBEK ZAPRAWY CEMENTOWEJ NA ICH WŁAŚCIWOŚCI POZNISZCZENIOWE**

1. Wprowadzenie

Jednym z powszechnie stosowanych materiałów w górnictwie oraz budownictwie specjalnym i podziemnym jest beton. Wykorzystywany jest on głównie jako materiał do wykonywania samodzielnej obudowy wyrobisk podziemnych, prefabrykowanych elementów innych typów obudów oraz kasztów, do uszczelniania i wzmocnienia górotworu w sąsiedztwie wyrobisk, także jako składnik materiału podsadzkowego. Beton jako substytut skały naturalnej jest jednym z współpracujących ze sobą elementów struktury górotworu otaczającego wyrobiska podziemne i powinien podlegać procedurom badawczym, stosowanym powszechnie dla skał naturalnych. Dlatego, podobnie jak dla skał naturalnych wskazane jest prowadzenie badań właściwości pozniszczeniowych betonów.

Beton jest konglomeratem ziaren kruszywa zespolonych poprzez stwardnienie zaczynu cementowego w procesie hydratacji. Zatem zarówno komponenty mieszanki betonowej (uwzględniając dodatki i domieszki modyfikujące) jak i postęp procesu hydratacji związany głównie z wiekiem betonu będą w istotny sposób wpływać nie tylko na jego właściwości wytrzymałościowe, lecz także na charakter procesu niszczenia, którego odzwierciedleniem jest pokrytyczna gałąź charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej.

2. Stan wiedzy o pozniszczeniowych właściwościach materiałów o spoiwie cementowym

Dotychczasowy zasób wiedzy na temat pokrytycznego zachowania się betonu jest niewielki, chociaż to właśnie badania próbek betonów prowadzone w latach 60. ubiegłego stulecia przez Rüscha [4], Saëza [5] i innych zaowocowały pojawieniem się nowych konstrukcji maszyn wytrzymałościowych i upowszechnieniem badań pozniszczeniowych głównie skał.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Artykuł opracowano w ramach badań statutowych WGiG AGH nr 11.11.100.277

Autorzy publikacji zagranicznych ograniczają się najczęściej do przedstawienia pełnych charakterystyk próbek młodego betonu w zależności od jego wieku i stosunku wodno-cementowego [6, 7], lub modyfikacji składu mieszanki betonowej [7–9]. W Polsce badań pozniszczeniowych betonu praktycznie nie prowadzi się. Główną barierą stanowi brak specjalistycznej a zarazem kosztownej aparatury badawczej. Stan ten wynika również z faktu, że obowiązujące w kraju normy i instrukcje odnośnie do badań właściwości mechanicznych betonu nie obejmują badań pozniszczeniowych a zalecany tryb sterowania maszyną wytrzymałościową wręcz uniemożliwia kontrolę procesu niszczenia próbki [14].

Wyniki większości badań laboratoryjnych dotyczących pokrytycznego zachowania się betonu wskazują, że wzrost wytrzymałości doraźnej betonu (zależny od wieku a także składu mieszanki), powoduje zwiększanie się wartości modułu pozniszczeniowego określanego ujemną wartością tangensa kąta nachylenia prostej będącej aproksymacją pozniszczeniowej części charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej. Co istotne — charakter procesu niszczenia odpowiada klasie pierwszej wg Wawersika [13]. Oznacza to, że niszczenie jest stabilne to znaczy, że aby zachodziła dezintegracja struktury próbki musi być dostarczona energia z zewnątrz (np. poprzez pracę maszyny wytrzymałościowej). Z drugiej strony, obserwowane w laboratoriach przypadki [10] wskazują na możliwość eksplozywnego niszczenia próbek betonu.

Badania, których wyniki prezentujemy prowadzone są w celu zweryfikowania tezy, że w materiałach o spoiwie cementowym (betony, zaprawy) stopień hydratacji zaczynu cementowego postępujący wraz z wiekiem badanego materiału może powodować także zmianę klasy pozniszczeniowego zachowania z pierwszej na drugą. Oznacza to, że po przekroczeniu wytrzymałości doraźnej na ściskanie, zakumulowana energia może wyzwalać się w sposób gwałtowny.

3. Badania laboratoryjne

Badania przeprowadzono na próbkach w kształcie walców o wysokości $h = 110$ mm i średnicy $d = 55$ mm wykonanych z zaprawy przygotowanej zgodnie z polską normą PN-B-19701, wykorzystując cement portlandzki CEM I 52,5 R, piasek normowy i wodę, przy stosunku wodno-cementowym $w/c = 0,5$. Po upływie 28 dni próbki były obrabiane mechanicznie w celu zapewnienia wysokiej gładkości i równoległości podstaw — niezbędnych przy prowadzeniu badań pozniszczeniowych.

Przygotowane próbki zostały podzielone na serie przeznaczone do badań po osiągnięciu określonego wieku liczonego od dnia wykonania próbek:

- seria I — obejmowała próbki zbadane po czasie 1 miesiąca (28 dni) dojrzewania,
- seria II — obejmowała próbki badane po osiągnięciu wieku 12 miesięcy,
- seria III — obejmowała próbki badane po osiągnięciu wieku 18 miesięcy.

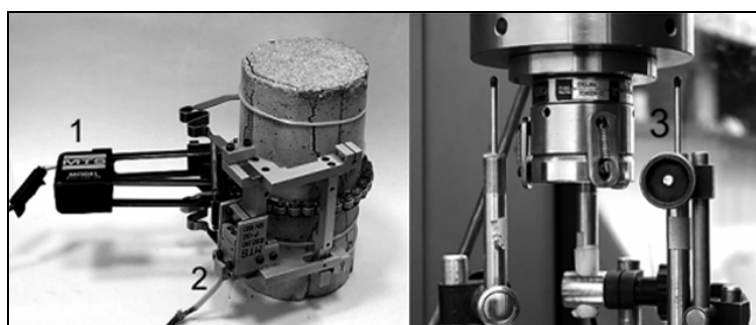
Oznaczenia laboratoryjne zostały wykonane w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, na serwosterowalnej maszynie wytrzymałościowej MTS-815 z systemem ste-

rowania TestStar, zapewniającej utrzymanie stałej prędkości przyrostu przemieszczenia lub naprężenia i automatyczną rejestrację pomiarów. Deklarowana przez producenta sztywność ramy prasy wynosi 11 GN/m i spełnia zalecenia ISRM [15].

Wygląd stanowiska do badań wraz maszyną wytrzymałościową z systemem sterującym przedstawiono na fotografii (rys. 1). Na próbkę, w połowie jej wysokości zakładany był ekstensometr łańcuszkowy (1) — rysunek 2, do pomiaru odkształceń obwodowych próbki. Pomiar odkształceń podłużnych, był pomiarem globalnym na całej wysokości próbki za pomocą trzech czujników liniowych (3), zamontowanych pomiędzy płytami maszyny. Dodatkowo na próbkę zakładano ekstensometr (2), mierzący podłużne odkształcenia w jej środkowej części na bazie 50 mm. Pomiaru siły obciążającej próbkę dokonywano dynamometrem umiejscowionym nad próbką w układzie szeregowym.



Rys. 1. Maszyna sztywna MTS-815 w Laboratorium Badań Pozniszczeniowych KGBiG AGH



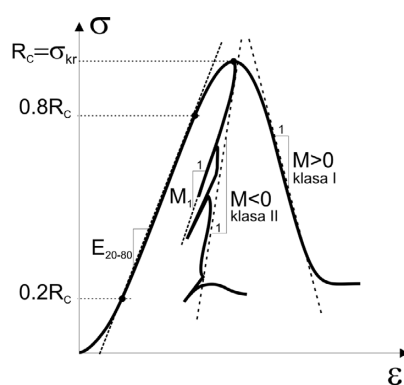
Rys. 2. Sposób usytuowania czujników na próbce betonowej i w prasie wytrzymałościowej

W trakcie badania rejestrowane były następujące wielkości:

- czas eksperymentu i odczytu pomiarów,
- wartość siły obciążającej próbkę,
- przemieszczenie obwodowe próbki,
- przemieszczenie osiowe z ekstensometru na próbce,
- przemieszczenia płyt maszyny mierzone trzema ekstensometrami liniowymi.

Zapis dokonywany był z częstotliwością nie mniejszą niż 1 Hz.

Wskazania wszystkich czujników przemieszczeń (odkształceń) oraz siły są przetwarzane przez system TestStar i mogą służyć jako sygnał sterujący procesem obciążania [12]. Wstępnie założono, że badania przebiegu procesu niszczenia próbek wykonane zostaną w trybie sterowania ze stałą prędkością odkształceń podłużnych $\dot{\epsilon}_z = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ zarówno w fazie przed- jak i pokrytycznej. W tym trybie układ sterujący podejmuje decyzje o ruchu tłoka na podstawie uśrednionej wartości wskazań trzech czujników przemieszczeń osiowych opisanych wcześniej. Taki tryb sterowania jest w pełni odpowiedni do badania materiałów, które wykazują charakter niszczenia klasy I. Takie zachowanie betonów najczęściej podaje literatura. Kruche pęknięcie niektórych próbek serii I sugerujące, że intensywność niszczenia w fazie pokrytycznej jest większa niż spodziewana i przechodzi w zachowanie klasy II (rys. 3), spowodowało konieczność zmiany przyjętych założeń dotyczących sposobu sterowania maszyną w pozniszczeniowej fazie badań. Aby w pełni zarejestrować przebieg niszczenia kolejnych serii starszych próbek zastosowano tryb sterowania ze stałą prędkością odkształceń obwodowych mierzonych ekstensometrem zamontowanym na próbce. Próbki serii II i III obciążane były w fazie przedkrytycznej tak jak poprzednio (stała prędkość odkształceń podłużnych $\dot{\epsilon}_z = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) a po osiągnięciu naprężenia wynoszącego $70\div 80\% R_C$ przełączano na tryb sterowania ze stałą prędkością odkształceń obwodowych wynoszącą $\dot{\epsilon}_z = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. W tym trybie kontynuowano obciążanie do chwili, kiedy próbka osiągnęła poziom naprężeń rezydualnych lub nastąpił całkowity spadek naprężeń [11].



Rys. 3. Sposób liczenia modułu sprężystości E oraz modułów pozniszczeniowych M i M_1

4. Wyniki badań

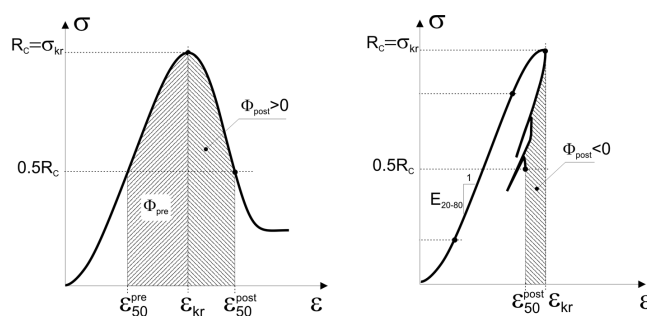
Zarejestrowane dane zostały poddane analizie, która polegała między innymi na wyznaczeniu następujących parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych:

- wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (R_C) — naprężenie niszczące; największa wartość jaką na osi naprężeń osiągał wykres $\sigma - \epsilon$ obciążania próbki;
- moduł Younga E20-80 (rys. 3) obliczony jako współczynnik kierunkowy prostej regresji liniowej, za pomocą której aproksymowano wykres zależności $\sigma(\epsilon)$ w granicach $20 \div 80\% R_C$;
- moduł pozniszczeniowy M (rys. 3) — charakteryzujący przebieg niszczenia próbki, obliczony jako współczynnik kierunkowy prostej regresji w fazie pokrytycznej, zwykle dla naprężeń w granicach $50 \div 80\% R_C$;
- moduł odkształcalności w chwili pierwszego kruchego pęknięcia M_1 (rys. 3), obliczony jako współczynnik kierunkowy prostej regresji w fazie pokrytycznej w chwili pojawienia się pierwszego kruchego pęknięcia kontrolowanego przez system sterowania pracą maszyny;
- praca odkształceń w części przedkrytycznej Φ_{pre} (rys. 4), obliczona na podstawie przebiegu charakterystyki $\sigma = f(\epsilon)$ jako wartość pracy sił zewnętrznych, potrzebnej na doprowadzenie próbki nieobciążonej lub wstępnie obciążonej do osiągnięcia naprężeń krytycznych;

$$\Phi_{pre} = \int_{\epsilon_{50}^{pre}}^{\epsilon_{kr}} f(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

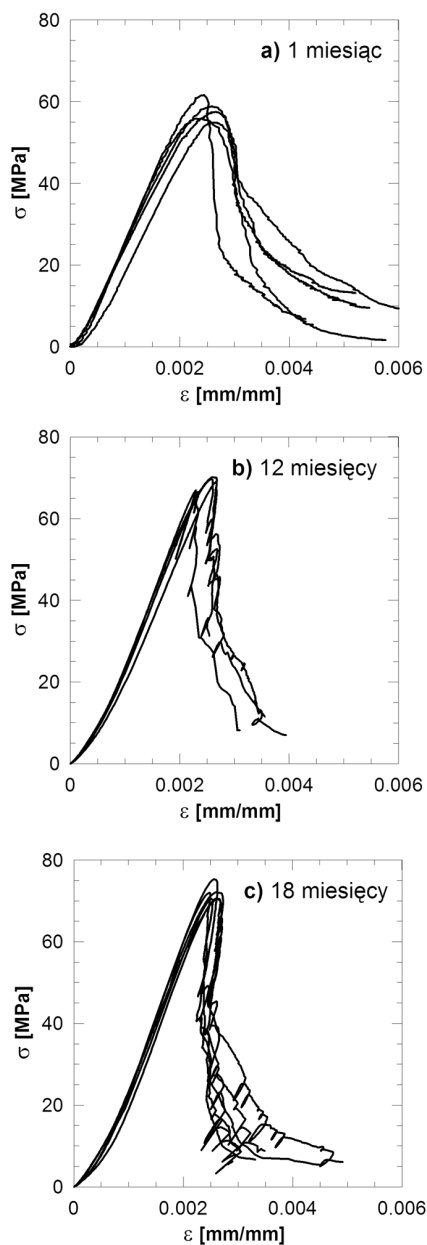
- praca odkształceń w części pokrytycznej Φ_{post} (rys. 4), tj. praca sił niezbędna do zmniejszenia nośności próbki od wartości maksymalnej do umownie przyjętej jako końcowa (najczęściej jest to połowa nośności maksymalnej);

$$\Phi_{post} = \int_{\epsilon_{kr}}^{\epsilon_{50}^{post}} f(\epsilon) d\epsilon \quad (2)$$



Rys. 4. Sposób liczenia prac Φ_{pre} i Φ_{post}

W oparciu o wyniki badań sporządzono charakterystyki naprężeniowo odkształceniowe próbek (rys. 5).



Rys. 5. Charakterystyki pozniszczeniowe próbek w wieku: a) 1 miesiąca, b) 12 miesięcy, oraz c) 18 miesięcy

Na ich podstawie wyznaczono wartości wytrzymałości doraźnej R_C , oraz parametrów odkształceniowych: modułu sprężystości E , i modułu pozniszczeniowego M i M_1 oraz wartości prac odkształceń w części przedkrytycznej Φ_{pre} i pokrytycznej Φ_{post} badanych próbek.

Obliczone parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Właściwości mechaniczne badanych próbek

	Numer próbki	R_C , MPa	E , GPa]	M , GPa	M_1 , GPa	Φ_{pre} , MJ/m ³	Φ_{post} , MJ/m ³
I seria (1 m-cy)	1_01	57,48	26,41	94,12	–	0,0242	0,01259
	2_01	54,89	27,21	60	–	0,02259	0,01146
	3_01	58,87	27,86	59,46	–	0,026	0,00974
	4_01	55,86	30,6	60,76	–	0,02416	0,01585
	5_01	61,65	31,86	189,93	–	0,02323	0,00427
	średnia:	57,75	28,79	92,85	–	0,02404	0,01078
II seria (12 m-cy)	1_12	69,69	33,43	–355,40	–80,51	0,02389	0,00042
	2_12	69,13	31,1	396,67	–112,22	0,02311	–0,00113
	3_12	66,93	34,97	–1302,86	–43,74	0,01785	–0,00011
	4_12	70,18	33,55	271,48	–142,35	0,02494	0,00296
	średnia:	68,98	33,26	–247,53	–94,71	0,02245	0,00054
III seria (18 m-cy)	1_18	72,15	34,37	–100,00	–78,42	0,02491	–0,00345
	2_18	70,62	33,4	–104,65	–75,19	0,02551	–0,00310
	3_18	70,61	35,25	–220,00	–80,85	0,023	–0,00310
	4_18	75,31	37,03	–153,13	–80,03	0,02189	–0,00646
	5_18	72,03	36,52	–284,81	–75,51	0,02188	–0,00282
	6_18	70,49	35,25	–170,63	–77,24	0,02229	–0,00387
	średnia:	71,87	35,31	–170,20	–77,84	0,02325	–0,00380

Analiza wyników badań uzyskanych dla poszczególnych serii próbek wskazuje, że wiek próbek w wyraźny sposób wpływa zarówno na przed- jak i pozniszczeniowe właściwości badanego materiału. Wzrasta wytrzymałość doraźna na ściskanie, przy czym prędkość tego wzrostu maleje wraz z wiekiem badanych próbek. W podobny sposób wraz z wiekiem serii próbek zwiększa się moduł sprężystości podłużnej. Te zmiany spowodowane twardnieniem zaczynu cementowego są znane i opisywane w literaturze [1, 2].

Bardziej interesująca jest analiza pozniszczeniowych części charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej badanych próbek. Pierwsza seria wykazuje wyraźne zachowanie wg klasy I, o czym świadczy moduł pozniszczeniowy (M) kształtujący się w granicach wartości od 60 do 190 GPa.

Druga seria próbek badana po upływie 12 miesięcy pokazuje, że część próbek wykazuje pokrytyczne zachowanie według klasy pierwszej, zaś intensywność niszczenia pozostałych próbek zaczyna wykazywać zachowane klasy drugiej. Trzecia seria próbek zbadana po 18 miesiącach od chwili ich wykonania wyraźnie wskazuje (ujemna wartość modułu M), że próbki w fazie pozniszczeniowej zachowują się wg klasy drugiej, co oznacza, że w trakcie niekontrolowanego niszczenia zakumulowana energia może wyzwać się w sposób gwałtowny.

Aby podjąć próbę ilościowego opisu uzyskanych wyników należy przyjrzeć się przebiegowi hydratacji, w której składniki cementu w obecności wody wytwarzają produkty hydratacji, które z czasem tworzą stwardniały zaczyn cementowy. Hydratacja jest procesem długim i skomplikowanym. Prędkość i stopień hydratacji zależą zarówno od procentowej zawartości składników cementu, jak i zdolności do penetracji wody w głąb ziaren cementu. Krzemiany dwu- i trójwapniowe, których w cemencie jest najwięcej hydratyzują wolniej niż inne związki obecne w cemencie (np.: C_3A , C_4AF) [1]. Uważa się, że woda w ciągu 28 dni zdoła przeniknąć do ziaren cementu na głębokość do 5 μm a po upływie roku do około 8 μm . Wiedząc, że cement zawiera ziarna o maksymalnej średnicy nawet do 200 μm można śmiało założyć, że pełna hydratacja nie nastąpi nigdy [3].

Charakter procesu hydratacji, który odpowiada za zmiany przed- i pozniszczeniowych właściwości materiałów o spoiwie cementowym sugeruje, aby do opisu zmian właściwości badanych próbek stosować funkcje nieposiadające asymptoty równoległej do osi czasu. Najprostszą do opisu zmian właściwości $P(t)$ wydaje się być funkcja logarytmiczna postaci:

$$P(t) = P_{(1)} + k \cdot \ln(t) \quad (3)$$

gdzie:

$P_{(1)}$ — jest wartością właściwości P dla próbek po 1 miesiącu (normowy czas dojrzewania);

k — współczynnik określający prędkość zmian właściwości P w czasie.

Zmianę wytrzymałości doraźnej na ściskanie R_C w zależności od wieku serii próbek można wyrazić funkcją następującej postaci:

$$R_C(t) = R_{C(1)} + c \cdot \ln(t) \quad (4)$$

gdzie:

$R_{C(1)}$ — średnia wartość wytrzymałości na ściskanie dla próbek po 1 miesiącu dojrzewania;

c — współczynnik prędkości zmian wytrzymałości doraźnej wraz z wiekiem materiału.

W oparciu o wyniki pomiarów (tab. 1) obliczono:

- $R_{C(1)} = 57,8$ MPa,
- $c = 4,78$,
- współczynnik dopasowania $R^2 = 0,92$.

Zmianę wartości modułu Younga E w zależności od wieku serii próbek można wyrazić funkcją następującej postaci:

$$E(t) = E_{(1)} + b \cdot \ln(t) \quad (5)$$

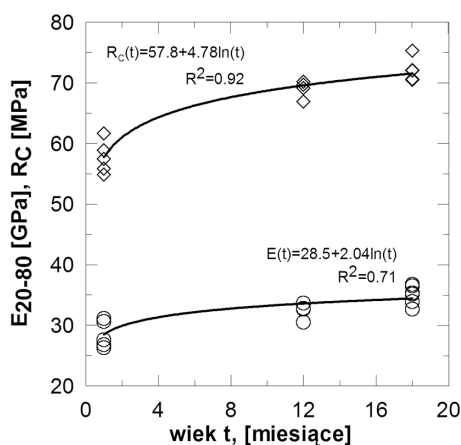
gdzie:

- $E_{(1)}$ — średnia wartość modułu Younga dla próbek po 1 miesiącu dojrzwania;
- b — współczynnik prędkości zmian modułu Younga wraz z wiekiem materiału.

W oparciu o wyniki pomiarów (tab. 1) obliczono:

- $E_{(1)} = 28,5$ GPa,
- $b = 2,04$,
- współczynnik dopasowania $R^2 = 0,71$.

Obliczone wartości wytrzymałości na ściskanie R_C i modułu sprężystości E wraz z dopasowaniem za pomocą funkcji logarytmicznej przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Zmiany wytrzymałości na ściskanie (\diamond) oraz modułu Younga (\circ) w zależności od wieku próbek

W celu opisanego klasy pozniszczeniowego zachowania się badanego materiału najczęściej wykorzystuje się wartości modułu pozniszczeniowego M . Ten sposób jest bardzo przejrzysty,

jeśli wszystkie badane próbki materiału zachowują się według tej samej klasy pozniszczeniowego zachowania się. W naszym przypadku bardziej celowym będzie posłużenie się wartościami pracy odkształceń w części przed- a zwłaszcza pokrytycznej obliczonej na podstawie przebiegu charakterystyki $\sigma = f(\epsilon)$. Z uwagi na to, że próbki reprezentują pozniszczeniowe zachowanie według odrębnych klas wygodniej było posłużyć się wartościami prac odkształceń liczonych w granicach od 50 do 100% R_C .

Wyniki badań wykazały brak korelacji dla zależności między pracą sił zewnętrznych Φ_{pre} a wiekiem próbki wyrażonej za pomocą funkcji logarytmicznej (3). Można więc podać wartość średnią ze wszystkich próbek wynoszącą $\Phi_{pre} = 0,024 \text{ MJ/m}^3$.

Dla obliczonych wartości pracy w części pokrytycznej Φ_{post} , tj. pracy sił niezbędnej do zmniejszenia nośności próbki od wartości maksymalnej do połowy nośności maksymalnej zastosowano aproksymację funkcją postaci:

$$\Phi_{post}(t) = \Phi_{post(1)} - d \cdot \ln(t) \quad (6)$$

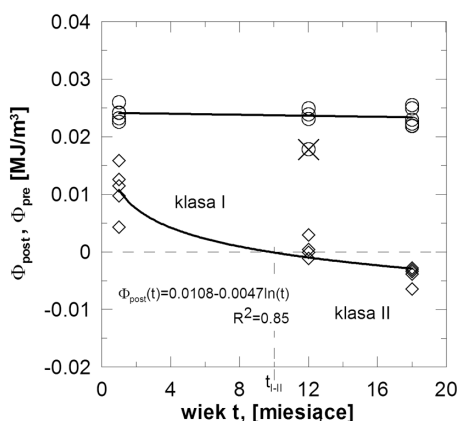
gdzie:

- Φ_{post} — średnia wartość energii Φ_{post} , próbek po 1 miesiącu dojrzewania,
- d — współczynnik prędkości zmian energii Φ_{post} , wraz z wiekiem materiału.

W oparciu o wyniki pomiarów obliczono (tab. 1):

- $\Phi_{post} = 0,0108 \text{ MJ/m}^3$,
- $d = 0,0047$,
- współczynnik dopasowania $R^2 = 0,85$.

Obliczone wartości prac w części przed- i pokrytycznej wraz z dopasowaniem za pomocą funkcji logarytmicznej przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Zmiany wartości prac Φ_{pre} (○) oraz Φ_{post} (◇) w zależności od wieku próbek

Warto zauważyć, że przyjęta funkcja aproksymująca dane eksperymentalne osiąga wartość $\Phi_{post} = 0$, dla $t_{I-II} \approx 10$ miesięcy. Ponieważ zerowa wartość energii Φ_{post} oznacza zachowanie idealnie kruche — można przyjąć, że t_{I-II} jest to wiek, w którym następuje przejście zachowania próbek z klasy I do II.

4. Podsumowanie

Zarówno analityczne formuły opisujące pełną charakterystykę naprężeniowo-odkształceniową betonu [6, 9], jak i wyniki większości badań laboratoryjnych [6–9] wskazują, że pokrytyczne zachowanie się tego materiału odpowiada klasie I wg klasyfikacji Wawersika. Oznacza to, że proces niszczenia próbki przebiega w sposób stabilny, a jego postęp wymaga dostarczania energii ze źródła zewnętrznego — np. pracującej maszyny wytrzymałościowej.

Przeprowadzone badania laboratoryjne pokazują, że w materiałach o spoiwie cementowym taki sposób niszczenia ma miejsce w materiale stosunkowo młodym o wieku niewiele przekraczającym umowny okres dojrzewania zaczynu cementowego. Wiek i związany z nim postęp procesu hydratacji jak wynika z badań nie tylko wpływa na wzrost wytrzymałości doraźnej, ale również może zmienić zachowanie się badanych próbek w fazie pokrytycznej z klasy pierwszej do drugiej co oznacza, że proces niszczenia przebiega w sposób wybuchowy.

Mimo, że badania przeprowadzono na próbkach zaprawy cementowej, wniosek ten zdaniem autorów, można śmiało rozszerzyć o materiały z kruszywem — betony, zarówno zwykłe jak również wysokowartościowe. Badanie na próbkach zapraw jest często stosowaną metodą w celu wyeliminowanie wpływu niejednorodności kruszywa na uzyskane wyniki, podczas gdy twardniejący zaczyn cementowy w podobny sposób zachowuje się zarówno w obecności grubszych frakcji kruszywa (beton) jak i drobnych (zaprawa).

W zagadnieniach związanych z geomechaniką i budownictwem podziemnym poznanie procesu niszczenia betonu jest równie istotna jak znajomość procesu niszczenia skał. Jednakże w przypadku skał, parametry pozniszczeniowe mogą jedynie określić charakter procesu niszczenia, podczas gdy dla materiału sztucznego, jakim jest beton wyniki badań pozniszczeniowych być może pozwolą na taki dobór składników mieszanki betonowej, aby osiągać nie tylko żadaną wytrzymałość, ale również wymaganą klasę pokrytycznego zachowania się uzyskanego materiału.

Zdaniem A.M. Neville [1] znajomość pokrytycznego zachowania się betonu jest szczególnie istotna w problematyce niszczenia żelbetu powszechnie stosowanego w różnych konstrukcjach inżynierskich.

LITERATURA

- [1] *Neville A.M.*: Właściwości betonu. Kraków, 2000
- [2] *Aitcin P.C.*: High-Performance Concrete. Modern Concrete Technology 5. E&FN SPON, London and New York, 1998
- [3] *Jamroży Z.*: Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Kraków, 2000
- [4] *Rüsch H., Sell R., Rackwitz R.*: Statistische Analyse der Betonfestigkeit. Berlin, W. Ernst 1969

- [5] *Sàenz L.P.*: Equation for the stress-strain curve of concrete. *ACI Journal*, 9, 1964
- [6] *Yi S-T., Kimb J-K., Kimb, Ohc T-K.*: Effect of strength and age on the stress-strain curves of concrete specimens. *Cement and Concrete Research* 33 (2003), 1235–1244
- [7] *Deutschmann K., Sicker A.*: Contribution to Improve the Ductility of High Performance Concrete by the Choice of Suitable Admixtures. *LACER No. 2*, 1997
- [8] *Nielsen C.V.*: Mechanical Properties for Green Concrete. XVIII Symposium on Nordic Concrete Research, Helsingor, June 2002
- [9] *Lee I., Punurai W., Hsu C-T. T.*: Complete Stress-Strain Behavior of High Performance Fly Ash Concrete. 15th ASCE Engineering Mechanics Conference 2002, Columbia University, New York
- [10] *Klisowski R., Szumiński A.*: Czynniki sprężenia zwrotnego systemu sterowania maszyną wytrzymałościową a wyniki badań charakterystyk pozniszczeniowych próbek betonu. *Górnictwo i Geoinżynieria AGH Kraków*
- [11] *Flisiak D., Klisowski R., Szumiński A.*: Metodyka badań a uzyskiwane charakterystyki pozniszczeniowe — uwagi o potrzebie standaryzacji. XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Kraków, 2002
- [12] *Flisiak D., Klisowski R., Szumiński A.*: Uwagi na temat sposobu prowadzenia testu jednoosiowego ściskania w serwosterowalnej maszynie wytrzymałościowej. XXV Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Kraków, 2002
- [13] *Wawersik W.R.*: Detailed analysis of rock failure in laboratory compression tests. Ph. D. Thesis, Univ. Minnesota, Minneapolis, 1968
- [14] Instrukcja ITB nr 194: Badanie cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach. ITB, Warszawa, 1998
- [15] *Fairhurst C.E., Hudson J.A.*: Draft ISRM suggested methods for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36 (1999) 279–289, Pergamon Press, 1999