

Jolanta BORUCKA – LIPSKA\*  
Politechnika Szczecińska

## WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE MŁODEGO BETONU ZWYKŁEGO I WYSOKOWARTOŚCIOWEGO

**Streszczenie.** Właściwości mechaniczne młodego betonu mają znaczenie w analizie uwarunkowań technologiczno-materiałowych procesu realizacji konstrukcji. Zmiany objętościowe twardniejącego betonu stanowią częstą przyczynę tworzenia się rys i pęknięć elementu konstrukcji jeszcze w fazie jej wznoszenia. W referacie przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych młodego betonu zwykłego i wysokowartościowego w początkowym okresie twardnienia. Na tym tle sformułowano tezę wskazującą na szczególną wrażliwość betonu wysokowartościowego na wczesne obciążenia pośrednie generowane naprężeniami wymuszonymi.

## THE MECHANICAL PROPERTIES OF EARLY AGE HIGH PERFORMANCE AND NORMAL STRENGTH CONCRETE

**Summary.** The mechanical properties of early age concrete have some significance in the analysis of engineering and material-related conditions while constructing a structure. Volumetric changes in concrete during its hardening are a frequent cause of cracks and fissures developing in a structural member during its erection. In this paper the results of some tests of mechanical properties of early age regular and high-grade concretes at the preliminary stage of their hardening are presented. Based upon such input a thesis is formulated, which indicates a particular susceptibility of high – grade concrete to early intermediate loads produced by forced stresses.

### 1. Wprowadzenie

Charakterystyki mechaniczne betonu podane w normach dotyczą betonu stwardniałego, dojrzewającego w określonych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych w umownym okresie 28 dni. Czasami jednak występują okoliczności, w których beton jest poddawany wyjątkowo wysokim obciążeniom we wczesnym stadium jego dojrzewania. Trudności związane z przewidywaniem zachowania się młodego betonu w następstwie wczesnych obciążeń grawitacyjnych, narzuconych odkształceń skurczowych w konstrukcjach ogólnego stosowania oraz odkształceń termicznych w konstrukcjach masywnych wynikają z niedostatecznej zna-

---

\* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Włodzimierz Kiernożycki, prof. PS.

jomości właściwości mechanicznych i reologicznych jego nie w pełni ukształtowanej struktury [1]. Problem następstw wysokiego wyężenia młodego betonu, szczególnie wówczas, gdy nie obserwuje się widocznych uszkodzeń konstrukcji, nie został dotychczas jednoznacznie wyjaśniony [2]. Zagrożenie wystąpienia uszkodzeń młodego betonu oraz następstw jego wczesnego wysokiego wyężenia zależy zarówno od występujących oddziaływań pośrednich, jak i jego właściwości sprężystych, wytrzymałościowych i reologicznych oraz zdolności do „regeneracji struktury”.

W referacie przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych młodego betonu zwykłego i wysokowartościowego w początkowym okresie twardnienia. Na tym tle sformułowano tezę wskazującą na szczególną wrażliwość betonu wysokowartościowego na wczesne obciążenia pośrednie generowane naprężeniami wymuszonymi.

## 2. Program badań

Program badań obejmował określenie właściwości mechanicznych młodego betonu zwykłego klasy B30 oraz wysokowartościowego klasy B90 we wczesnym okresie twardnienia oraz właściwości mechanicznych betonów stwardniałych w wieku 28 dni, poddanych uprzednio znacznym odkształceniom.

Do wykonania próbek z betonu zwykłego zastosowano mieszankę betonową o wskaźniku wodno-cementowym  $\omega = 0.5$ . Założono konsystencję plastyczną mieszanki, którą uzyskano przy następującym jej składzie: cement CEM I 32,5 – 350 kg/m<sup>3</sup>, woda – 170 l/m<sup>3</sup>, kruszywo naturalne o maksymalnej średnicy ziarna 16 mm – 1900 kg/m<sup>3</sup>.

Beton wysokowartościowy o konsystencji plastycznej i wskaźniku wodno-cementowym  $\omega = 0.3$  uzyskano przy składzie: cement CEM I 42,5 HSR NA– 450 kg/m<sup>3</sup>, woda – 135 l/m<sup>3</sup>, kruszywo naturalne frakcji 0÷2 mm ÷ 630 kg/m<sup>3</sup> oraz kruszywo bazaltowe frakcji 2÷16 mm – 1280 kg/m<sup>3</sup>. Do składu betonu dodano również pyły krzemionkowe – 45 kg/m<sup>3</sup> i superplastifikator dozowany poprzez rozpuszczenie w wodzie zarobowej w ilości równej 2,2% masy cementu.

Badania młodego betonu miały na celu:

- ustalenie wytrzymałości doraźnej betonu zwykłego po: 12, 18, 24, 30, 36 godzinach jego twardnienia, oraz wytrzymałości betonu wysokowartościowego po: 11, 11.45, 14, 15 i 16 godzinach twardnienia, a także porównawczo po 28 dniach,

- określenie modułu sprężystości betonów o zróżnicowanej wytrzymałości,
- ustalenie zależności  $\sigma$ - $\epsilon$  betonów, ściskanych po upływie podanych wyżej okresów twardnienia.

Program badań młodego betonu zwykłego i wysokowartościowego obejmował również porównawcze wyznaczenie ich charakterystyk reologicznych, a mianowicie [3]: pełzania, relaksacji oraz wczesnych zmian objętościowych generowanych początkowo pęcznieniem a później skurczem twardniejących betonów oraz ich następstw rejestrowanych w postaci wzrostu sił działających na próbki betonu pozbawionych swobody odkształcenia.

Badania wytrzymałości betonów na ściskanie prowadzono na próbkach cylindrycznych  $\phi 150 \times 300$  mm. Badania wytrzymałości betonu na rozciąganie prowadzono metodą bezpośredniego rozciągania próbek o wymiarach  $8 \times 8 \times 30$  cm. Moduł sprężystości badanych betonów wyznaczono po sześciokrotnym cyklu obciążeń wstępnych próbek, mierząc odkształcenia przy naprężeniach nie przekraczających 30% ich wytrzymałości doraźnej. Badania pełzania betonów zwykłego i wysokowartościowego zabezpieczonych przed wysychaniem folią PCV prowadzono po 24 godzinach ich twardnienia. Próbki badanego betonu poddawano naprężeniom o wartości odpowiadającej około 50% jego wytrzymałości doraźnej na rozciąganie. Pomiaru przemieszczeń bazy pomiarowej o długości 500 mm dokonywano z dokładnością  $0.5 \mu\text{m}$  w odstępach czasowych co 60 s, przy zachowaniu stałej wartości naprężenia z dokładnością  $\delta_{\sigma} = \pm 0.02$  MPa. Badania pełzania betonów prowadzono w okresie 120 godzin. Badania relaksacji młodych betonów prowadzono również po okresie 24 godzin ich twardnienia. Podobnie jak w wypadku pełzania, badanie próbki betonu poddano naprężeniom o wartości odpowiadającej około 50% ich wytrzymałości doraźnej na rozciąganie zachowując stałą wartość odkształcenia z dokładnością  $\delta_{\epsilon} = \pm 0.000002$ . Badania zmian objętościowych twardniejących betonów – pęcznienie i skurcz, mierzono w urządzeniu do badań reologicznych zakładając  $\sigma_0 = 0$ . Zmiany długości próbki rejestrowano z dokładnością  $0.5 \mu\text{m}$  począwszy od 12 godziny twardnienia betonu. Naprężenia wymuszone twardniejącego betonu generowane zmianami objętościowymi określano w kolejnym cyklu badań. Zakładając programowo stałą wartość odkształcenia  $\epsilon = \epsilon_0 = \text{const.}$ , mierzono zmiany nacisku czoła próbki na głowicę urządzenia z dokładnością 0,025 kN. Pozwalało to wnioskować o zmienności naprężeń wymuszonych wywoływanych początkowo pęcznieniem, a później skurczem twardniejącego betonu.

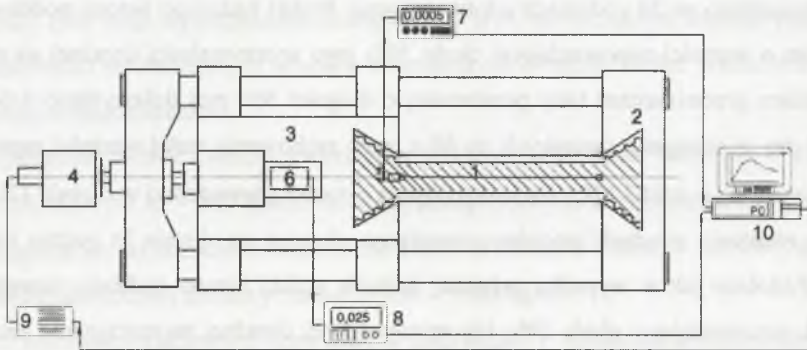
Celem określenia „wrażliwości” młodego betonu zwykłego i wysokowartościowego na wczesne wysokie wyężenie, obciążano je do granicy odpowiadającej 80% wyznaczonych wcześniej odkształceń granicznych. Po trzykrotnym obciążeniu i odciążeniu próbek młodego betonu przechowywano je na ruszcie nad wodą do chwili osiągnięcia wieku 28 dni. Wczesne obciążenia badanych próbek nie wywoływały na ich powierzchni widocznych uszkodzeń.

Badania betonów stwardniałych, poddanych wcześniej nadmiernym obciążeniom, obejmowały:

- ustalenie wytrzymałości miarodajnej,
- określenie modułu sprężystości,
- ustalenie zależności  $\sigma$ - $\epsilon$  przy ściskaniu.

### 3. Urządzenie do badań mechanicznych betonu w młodym wieku

Badania młodego betonu prowadzono za pomocą specjalnie skonstruowanego urządzenia. Ogólny schemat budowy urządzenia przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Urządzenie do badań próbek betonu w procesie twardnienia: 1 - próbka betonowa 10×10×70 cm, 2 - uchwyt nieruchomy urządzenia, 3 - uchwyt ruchomy urządzenia, 4 - układ napędu uchwytu ruchomego, 5 - czujnik pomiaru przesunięć, 6 - czujnik pomiaru siły, 7 - odczyt układu pomiarowego przesunięć, 8 - odczyt układu pomiarowego siły, 9 - sterownik układu napędu, 10 - jednostka centralna układu sterowania

Fig. 1. Device of testing concrete specimens during its hardening: 1 - concrete specimen 10×10×70cm, 2 - stationary holder, 3 - movable holder, 4 - system of power transmission movable holder, 5 - dislocation sensor, 6 - sensor of force measurement, 7 - redout of dislocations' system measurement, 8 - redout of force's system measurement, 9 - system of power transmission controller, 10 - central operating device

Próbka betonowa (1) o długości pomiarowej 700 mm i wymiarach przekroju poprzecznego 100×100 mm formowana jest w osi wzdłużnej urządzenia. Urządzenie umożliwia uzyskanie podczas doświadczenia odkształcenia osiowego próbki o określonej wartości lub wywarcia na

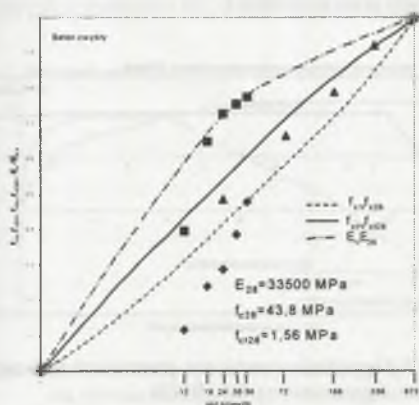
próbkę osiowej siły ściskającej albo rozciągającej. Realizowane jest to przez wywołanie przesunięcia chwytu ruchomego (3) względem nieruchomego (2). Minimalna wartość przesunięcia chwytu ruchomego, wywołana układem napędu (4), wynosi  $0,25 \mu\text{m}$ . Przesunięcia bazy pomiarowej, mierzone są za pomocą czujników optoelektrycznych (5) o dokładności wskazań  $\pm 0,5 \mu\text{m}$ . Pomiar wartości siły prowadzony jest tensometrycznym czujnikiem siły (6) o zakresie  $\pm 50\text{kN}$ , z dokładnością  $\pm 0,025 \text{kN}$ .

Zasadniczym elementem układu sterowania jest komputer (10), który poprzez sterownik (9) reguluje pracę układu napędowego (4). W trakcie doświadczenia dokonywany jest pomiar przemieszczeń bazy pomiarowej, jak i wartość siły działającej na badaną próbkę betonu. Wartości te – poprzez tory ujemnego sprzężenia zwrotnego, mogą być niezależnie porównywane w układzie regulacji z wartościami zadanymi w programie doświadczenia.

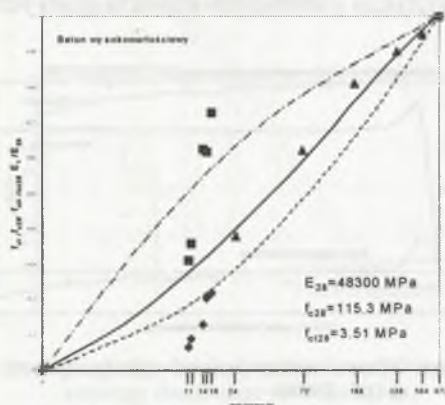
#### 4. Wyniki badań i ich omówienie

- Właściwości mechaniczne młodego betonu BZ i BWB

Wyniki badań zmian wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie betonu zwykłego (BZ) i wysokiej wytrzymałości (BWB) oraz zmian ich modułów sprężystości przedstawiono na rysunku 2 i 3. W analizowanym przedziale czasu zarówno w wypadku betonu BZ, jak i betonu BWB zaobserwowano relacje wskazujące na względnie szybszy wzrost ich cech sprężystych w porównaniu ze zmianami wytrzymałości.

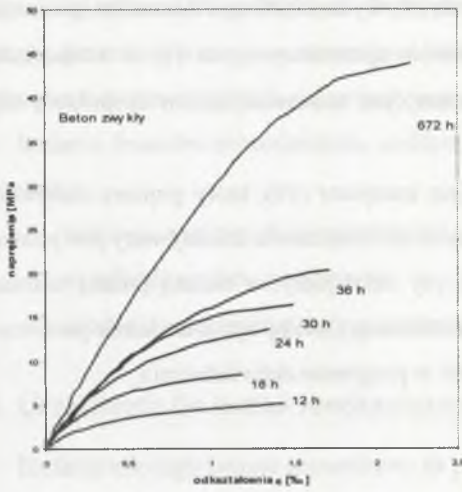


Rys. 2. Rozwój właściwości mechanicznych BZ  
Fig. 2. Development of mechanical properties of NSC

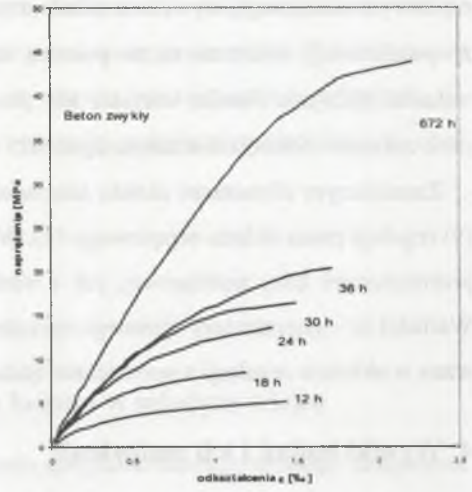


Rys. 3. Rozwój właściwości mechanicznych BWB  
Fig. 3. Development of mechanical properties of HPC

Uzyskane doświadczalnie zależności  $\sigma$ - $\epsilon$  młodego betonu ściskanego BZ i BWW w różnych stadiach twardnienia przedstawiono na rys. 4 i 5.

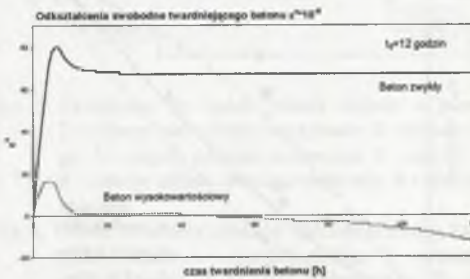


Rys. 4. Linie  $\sigma$ - $\epsilon$  betonu BZ w młodym wieku  
Fig. 4. The relationships  $\sigma$ - $\epsilon$  of early age NSC

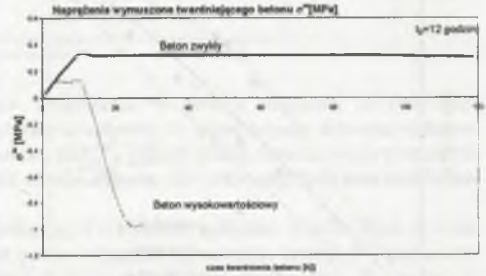


Rys. 5. Linie  $\sigma$ - $\epsilon$  betonu BWW w młodym wieku  
Fig. 5. The relationships  $\sigma$ - $\epsilon$  of early age HPC

Trudności związane z określeniem charakterystyk mechanicznych twardniejącego betonu wiążą się z nierównomiernym rozwojem jego właściwości wytrzymałościowych i sprężystych [4,5]. Młody beton wykazuje zarówno właściwości ciała sprężysto-kruche, jak plastycznego. Kształt linii  $\sigma$ - $\epsilon$  związany jest z wiekiem betonu w chwili obciążenia, przy czym udział odkształceń plastycznych maleje w miarę wzrostu jego wytrzymałości.



Rys. 6. Odształcenia swobodne twardniejącego betonu BZ i BWW  
Fig. 6. Free strains of hardening NSC and HPC

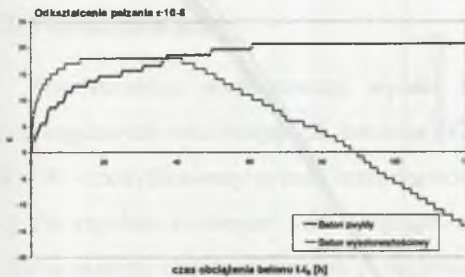


Rys. 7. Naprężenia wymuszone generowane zmianami objętościowymi BZ i BWW  
Fig. 7. Forced Stresses generated by volume change of NSC and HPC

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki badań swobodnych zmian liniowych próbek -  $\epsilon^s$  betonu zwykłego i wysokowartościowego, a na rysunku 7 naprężenia wymuszone -  $\sigma^w$  generowane ich zmianami objętościowymi w początkowym okresie twardnienia. Próbka betonu zwykłego, izolowana od zmian wilgoci z otoczeniem, po początkowym okresie pęcznienia do wartości  $\epsilon^s = 80 \mu\text{m/m}$ , a następnie nieznacznym skurczu nie wykazywała dalszych zmian objętościowych. Próbka betonu wysokowartościowego w początkowym okresie twardnienia wykazała nieznaczne pęcznienie  $\epsilon^s = 18 \mu\text{m/m}$ , a po upływie ok. 52 godzin – licząc od chwili wymieszania składników, ciągły skurcz, który po 240 godzinach osiągnął wartość  $\epsilon^s = -68 \mu\text{m/m}$ . Wczesne pęcznienie betonów, twardniejących w warunkach braku swobody odkształcenia, wywołało wzrost naprężeń ściskających badanych ciał próbnych: do wartości ok. 0.4 MPa – BZ oraz ok. 0.1 MPa – BWW. Późniejszy skurcz BWW wywołuje naprężenia rozciągające, które po ok. 40 godzinach twardnienia przekraczają chwilową wytrzymałość twardniejącego betonu na rozciąganie i w konsekwencji ich zniszczenie przez zerwanie.

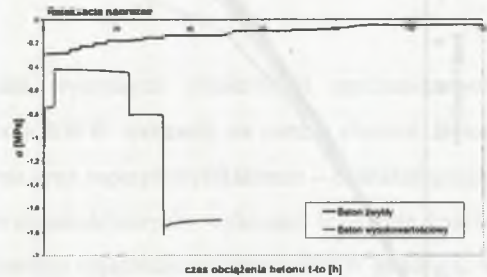
Przedstawione wyniki badań wskazują na znaczenie skurczu w betonie wysokowartościowym, modyfikowanym pyłami krzemionkowymi i superplastyfikatorem. Szybko postępujący skurcz betonu BWW, twardniejącego w warunkach braku swobody odkształcenia, wywołał zniszczenie badanych ciał próbnych już w początkowym okresie przemiany cementu.

Swobodne odkształcenia objętościowe młodego betonu wywierają wpływ na proces pełzania i relaksacji. Rysunki 8 i 9 przedstawiają wyniki badań pełzania i relaksacji próbek wykonanych z betonów BZ i BWW, rozciąganych po 24 godzinach ich twardnienia.



Rys. 8. Odkształcenia opóźnione twardniejącego betonu wysokowartościowego i zwykłego obciążonego w wieku 24 h

Fig. 8. Delayed strains of HPC and NSC loaded at 24 hours



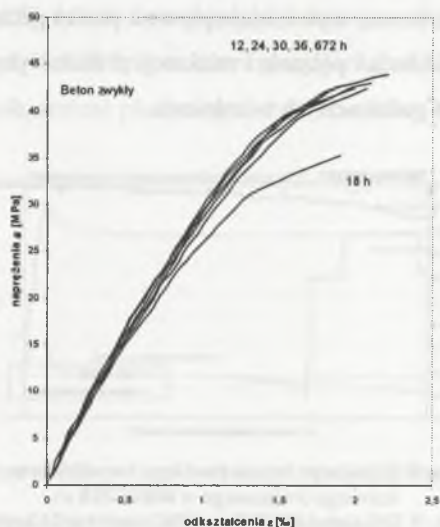
Rys. 9. Relaksacja betonu zwykłego i wysokowartościowego obciążonego w wieku 24 h

Fig. 9. Relaxation of HPC and NSC loaded at 24 hour

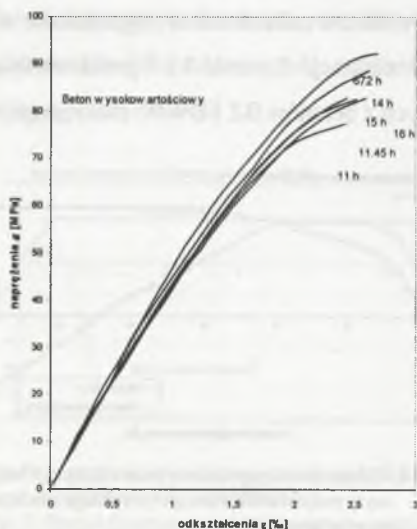
Zależności:  $\epsilon = f(t)$  – określające pełzanie oraz  $\sigma = f(t)$  – określające relaksację młodego betonu zwykłego są zgodne z znanymi z literatury funkcjami: monotonicznie rosnącymi – w wypadku pełzania oraz monotonicznie malejącymi – w wypadku relaksacji. Znaczny skurcz samoczynny betonu wysokowartościowego zakłóca te relacje. Naprężenia rozciągające generowane skurczem betonu BWW wpływają na zależność  $\epsilon = f(t)$  – w teście pełzania, a w teście relaksacji prowadzą do zniszczenia badanych ciał próbnych przez ich zerwanie [3].

- Wrażliwość młodego betonu BZ i BWW na wczesne obciążenia

Rysunki 10 i 11 przedstawiają linie  $\sigma - \epsilon$  betonów BZ oraz BWW stwardniałych – po 28 dniach twardnienia, obciążonych wcześniej w wieku: 12, 18, 24, 30 i 36 godzin – beton BZ, oraz: 11, 11.45, 14, 15 i 16 godzin – beton BWW, do wartości odpowiadającej 80% ich odkształceń granicznych. Wyniki badań betonu zwykłego, przedstawione na rysunku 10, wskazują na nieznaczne różnice linii  $\sigma - \epsilon$  próbek betonu obciążonego po raz pierwszy w wieku 28 dni oraz próbek betonu w tym samym wieku, ale obciążonych wcześniej po 12, 24, 30, i 36 godzinach twardnienia. Jedynie próbkę betonu obciążoną wcześniej w wieku 18 godzin charakteryzuje wyraźnie niższa wytrzymałość oraz niższe odkształcenia  $\epsilon_{c1}$ . W wypadku betonu wysokiej wytrzymałości różnice pomiędzy liniami  $\sigma - \epsilon$  próbek betonu obciążonych w młodym wieku oraz próbki nie obciążanej są również nieznane.



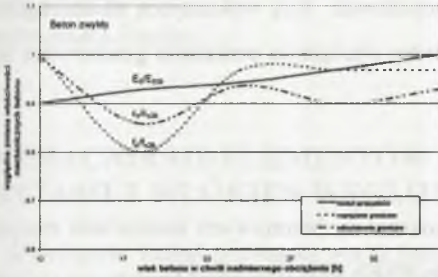
Rys. 10. Linie  $\sigma - \epsilon$  stwardniałych betonów BZ  
Fig. 10. The Relationships  $\sigma - \epsilon$  of hardened NSC



Rys. 11. Linie  $\sigma - \epsilon$  stwardniałych betonów BWW  
Fig. 11. The Relationships  $\sigma - \epsilon$  of hardened HPC

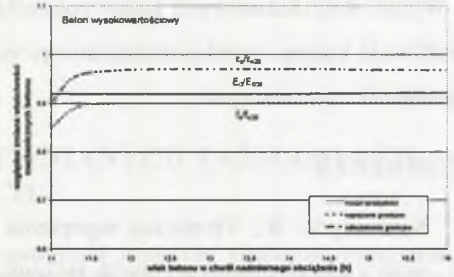


Na rysunkach 12 i 13 podano względne zmiany wytrzymałości –  $f_c$ , odkształceń –  $\epsilon_{c1}$  i modułu sprężystości –  $E$  betonów stwardniałych BZ i BWW poddanych znacznym odkształceniom w młodym wieku.



Rys. 12. Następstwa wczesnego nadmiernego obciążenia betonu BZ

Fig. 12. The sequences of early excessive loading of NSC



Rys. 13. Następstwa wczesnego nadmiernego obciążenia betonu BWW

Fig. 13. The sequences of early excessive loading of HPC

Wyniki badań wskazują na maksymalne 20% obniżenie wytrzymałości betonu BZ, 15% obniżenie jego odkształceń  $\epsilon_{c1}$ , oraz ok. 10% obniżenie modułu sprężystości. W wypadku betonu BWW następstwa, nadmiernego wczesnego obciążenia są relatywnie mniejsze i wynoszą odpowiednio: 10% - w odniesieniu do wytrzymałości  $-f_c$  oraz 5% w odniesieniu do odkształceń  $\epsilon_{c1}$  i 8% w odniesieniu do modułu sprężystości -  $E$ . Można sądzić, że mniejsza wrażliwość betonu BWW na wczesne wysokie obciążenia związana jest z jego wyższym - w porównaniu z betonem BZ - „potencjałem hydratacyjnym”, wynikającym z większej ilości dozowanego cementu oraz obecności dodatków mineralnych.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione porównawczo wyniki badań wybranych właściwości mechanicznych i reologicznych twardniejących betonów BZ oraz BWW wskazują na istotne różnice. Beton BWW - modyfikowany pyłami krzemionkowymi oraz superplastyfikatorem – charakteryzujący się szybkim rozwojem cech sprężysto-wytrzymałościowych, wykazuje w okresie twardnienia znaczny skurcz samoczynny. Wczesne zmiany objętościowe betonu BWW generują, w warunkach braku swobody odkształcenia wykonanego fragmentu konstrukcji, wymuszone naprężenia rozciągające. Jednocześnie beton wysokowartościowy jest mniej wrażliwy na następstwa wczesnego nadmiernego obciążenia w porównaniu z betonem zwykłym. Porównawcza ocena następstw wczesnych zmian objętościowych betonów BZ i BWW wywołanych

skurczem i ciepłem twardnienia spoiwa cementowego – generujących naprężenia wymuszone, wymaga przeprowadzenia oddzielnych testów laboratoryjnych, symulujących rzeczywiste warunki ich twardnienia we wnętrzu konstrukcji o zróżnicowanej masywności.

Wyniki dotychczasowych badań pozwalają sformułować tezę wskazującą na szczególną wrażliwość betonu wysokowartościowego na wczesne obciążenia pośrednie generowane naprężeniami wymuszonymi.

## LITERATURA

1. Kiernożycki W.: Termiczne naprężenia wymuszone w betonowych budowlach masywnych z uwzględnieniem zjawisk reologicznych, PNPS 487, IIL, 31/1992.
2. Byfors J.: Plain concrete at early ages, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Fo.30, 80, Stockholm 1980.
3. Freidenberg P.: Pełzanie i relaksacja młodego betonu rozciąganego. Praca doktorska, Politechnika Szczecińska 2000.
4. Kiernożycki W.: Wytrzymałość i współczynnik sprężystości betonu o różnym stopniu przemian strukturalnych, AIL, t XXXVII, 2.1, 1991.
5. Król M.: Właściwości wytrzymałościowe młodego betonu, Inżynieria i Budownictwo, 1, 1987.

Recenzent: Dr hab. inż. Jacek Śliwiński, prof. PK

## Abstract

The process of cement transformation is accompanied by volume changes of hardening concrete: expansion, autogenous shrinkage, ecological shrinkage, thermal strains caused by heat of binder hardening. Early volume changes of hardening concrete, caused an increase of stresses, which effecting in cracks and fracture creation in construction. The consequences of existing defects of early age concrete and the sequences its early, high effort depends on indirect influences: elastic properties, strength and rheological properties and its ability to "regeneration of structure". In the paper, there were presented experimental results of development of mechanical and rheological properties of early age High Performance and Normal Strength Concrete. On this basis, the thesis of particular sensitivity of HPC on indirect influences at early age were formulated.