

Tadeusz Hop
Ryszard Maćkowski

ODKSZTAŁCENIA NIEKTÓRYCH BETONÓW POLIMEROWYCH POD OBCIĄŻENIEM DORAŻNYM I DŁUGOTERWALNYM

1. Wstęp

Beton polimerowy jest sztucznym kamieniem powstającym dzięki utwardzeniu termoreaktywnej kompozycji żywicznej zmieszanej z kruszywem, które zwane jest też wypełniaczem. Najczęstszymi zastosowaniami betonu polimerowego są obecnie posadzki w obiektach przemysłowych, nawierzchnie mostowe oraz naprawy i wzmocnienia konstrukcji z betonów cementowych. Znane są również próby zastosowań betonu polimerowego do produkcji rur oraz do konstrukcji narażonych na działanie takich czynników, które powodowałyby korozję stali lub betonu cementowego.

Przydatność betonu polimerowego do celów konstrukcyjnych określają przede wszystkim takie jego cechy jak: wysoka wytrzymałość osiągana w krótkim stosunkowo czasie i bardzo dobra (na ogół) przyczepność do innych materiałów - w szczególności do betonu cementowego, stali, ceramiki, drewna i szkła. Dzięki tej przyczepności możliwe jest użycie betonu polimerowego w różnych konstrukcjach zespolonych o strukturze warstwowej. Przy stosowaniu betonu polimerowego do konstrukcji wytrzymałość jest warunkiem koniecznym ale nie wystarczającym. Materiał konstrukcyjny nie może odkształcać się ponad miarę wyznaczoną względami bezpieczeństwa, funkcjonalności i estetyki. Ustalone dla odkształceń granice muszą być zachowane w ciągu całego okresu eksploatacji konstrukcji bez względu na charakter działających obciążeń. Chcąc świadomie regulować sztywność konstrukcji wykonywanych przy użyciu betonu polimerowego, trzeba poznać mechanizm odkształcania się tego materiału pod wpływem różnych obciążeń i w różnych warunkach. Praca niniejsza do-

tyczy odkształceń pięciu odmian betonu polimerowego pod obciążeniem dcerażnym (krótkotrwałym) i długotrwałym.

2. Program badań

Celem badań było określenie przebiegu odkształceń wybranych betonów polimerowych pod obciążeniem krótkotrwałym i długotrwałym oraz ustalenie wielkości tych odkształceń. Poza tym postanowiono wyznaczyć wytrzymałość tych betonów z jednoczesnym ujęciem wpływu kształtu i wymiarów próbek na tę własność.

Program badań został dostosowany do przygotowanych wcześniej urządzeń: 10 peźzarek sprężynowych do długotrwałego ściskania i stanowiska do długotrwałego zginania pod obciążeniem grawitacyjnym. Peźzarki sprężynowe pozwalają ścisnąć jednocześnie dwa słupek 10x10x50 cm stałą siłą nie przekraczającą 40 000 kG. Na stanowisku do długotrwałego zginania można poddać równocześnie obciążeniu 24 belki. Rozpiętość każdej belki wynosi 60 cm, a wymiary jej przekroju można dostosowywać do rodzaju materiału. Do pomiaru odkształceń przy ściskaniu i ugięć przy zginaniu może służyć jeden tensometr mechaniczny przykładany z wymiennym czujnikiem 0,01 mm lub 0,001 mm.

Urządzenia do badań peźzania znajdują się w izolowanych pomieszczeniach piwnicznych, gdzie temperatura utrzymuje się na poziomie $16 \pm 18^{\circ}\text{C}$, a wilgotność względna powietrza wynosi 75-85%.

Elementy próbne wykonane zostały z następujących betonów polimerowych:

- epoksydowo-piaskowy, "E"
- poliestrowo-piaskowy, "P"
- fenolowo-piaskowy, "FA" i "FF"
- fenolowo-keramzytowy "FK".

Skład zastosowanych betonów podano w tablicy 1.

Tablica 1

Zawartość poszczególnych składników w betonach doświadczalnych

Składnik	Zawartość składnika (w częściach ciężarowych) w betonie o symbolu				
	E	P	PA	PF	PK
Piasek płukany 0-2 mm	100	100	100	100	-
Keramzyt 0-10 mm	-	-	-	-	100 ^{x)}
Epidian 5	21	-	-	-	-
Polimal 109	-	28	-	-	-
Żywica AG	-	-	18	-	-
Żywica F-100	-	-	-	18	26
Utwardzacz Z-1	2,1	-	-	-	-
Pasta WACH	-	0,6	-	-	-
Naftianian ko- baltu	-	3 ml kg żywicy	-	-	-
Utwardzacz AG	-	-	3,2	2,7	6,8

x) Uziarnienie keramzytu: 38,5% fr. 0-1, 24,7% fr. 1-2,
21,8% fr. 2-4 i 15% fr. 4-10

Z betonów doświadczalnych wykonano następujące próbki:

- słupki 10 x 10 x 50 cm,
- kostki \square 10 cm,
- walce $\phi = h = 8$ cm,
- beleczki 4 x 4 x 16 cm,
- beleczki 2 x 4 x 70 cm.

Liczbowe zestawienie próbek zawiera tablica 2.

Tablica 2

Zestawienie liczbowe próbek z betonów doświadczalnych

Rodzaj i wymiary próbek	Liczba próbek z betonu o symbolu				
	E	P	FA	FF	FK
Słupki 10x10x50 cm	8	6	6	6	4
Kostki \square 10 cm	8	6	6	4	4
Walce $\phi = h = 8$ cm	9	9	-	6	-
Beleczki 4x4x16 cm	27	21	12	27	15
Beleczki 2x4x70 cm	12	12	-	12	-

Tablica 3

Wytrzymałość i moduł sprężystości betonów doświadczalnych

Rodzaj wytrzymałości i próbek		Wytrzymałość w kg/cm^2 betonu o symbolu				
		E	P	FA	FF	FK
Na ściszenie	R_s słupki 10x10x50 cm	955	614	262	302	178
	R_s słupki 4x4x16 cm	830	454	265	348	106
	R_k kostki \square 10 cm	836	639	300	404	181
	R_w walce $\phi = h = 8$ cm	743	632	-	427	-
	R_b $\frac{1}{2}$ (4x4x16 cm)	640	743	374	471	130
Na zginanie - R_g beleczki 4x4x16 cm		201	153	57	62	50
Słupki 10x10x50 cm		Moduł sprężystości $E \times 10^{-3}$ w kg/cm^2 .				
		199	173	17	29	42

3. Wytrzymałość betonów doświadczalnych

Wyniki badań wytrzymałościowych zestawiono w tabelicy 3. Analiza tych wyników nie daje jeszcze wniosków odnośnie wpływu kształtu i wymiarów próbek na wytrzymałość betonów polimerowych. Zarysowały się jednak - szczególnie w przypadku betonu poliestrowo-piaskowego i betonów fenolowo-piaskowych - pewne zależności zbliżone do tych, jakie występują przy porównywaniu wytrzymałości próbek z betonu cementowego różniących się formą i wymiarami.

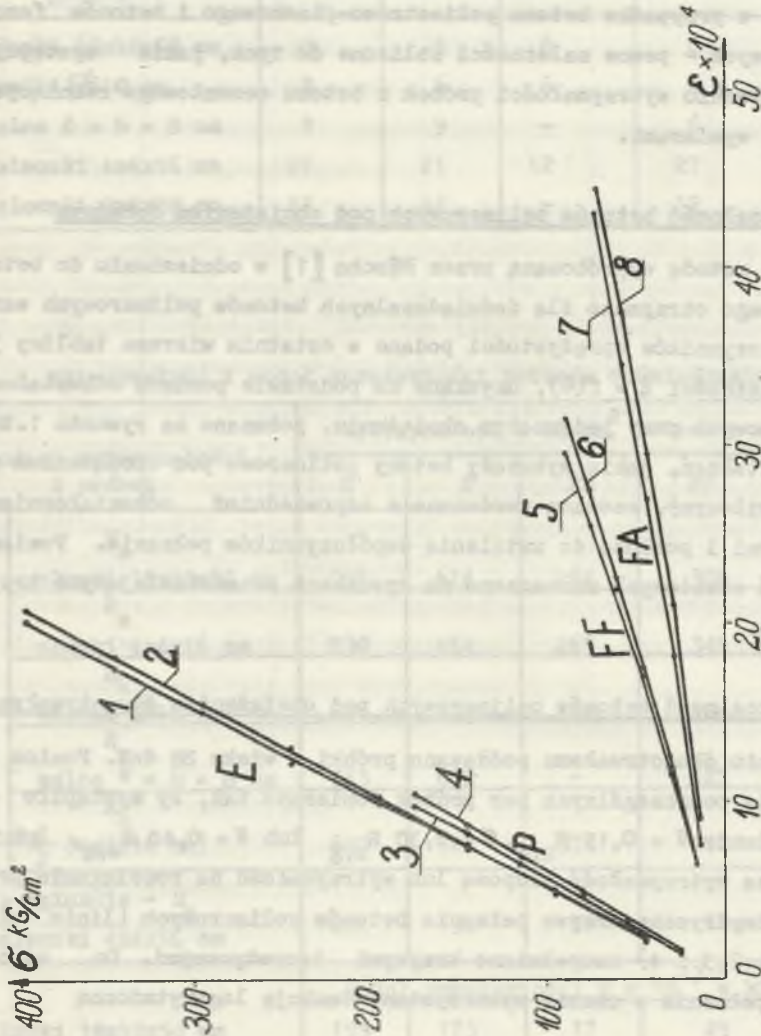
4. Odkształcalność betonów polimerowych pod obciążeniem doraźnym

Stosując metodę wypróbowaną przez Rüsscha [1] w odniesieniu do betonu cementowego otrzymano dla doświadczalnych betonów polimerowych wartości współczynników sprężystości podane w ostatnim wierszu tabelicy 3. Wykresy zależności $\xi = f(\sigma)$, uzyskane na podstawie pomiaru odkształceń próbek skupowych przy jedenastym obciążeniu, pokazano na rysunku 1. Wartości odkształceń, jakie wykazały betony polimerowe pod obciążeniem doraźnym (chwilowym), zostaną porównane z odpowiednimi odkształceniami reologicznymi i posłużą do ustalenia współczynników pełzania. Poziomy odkształceń chwilowych zaznaczono na rysunkach przedstawiających krzywe pełzania.

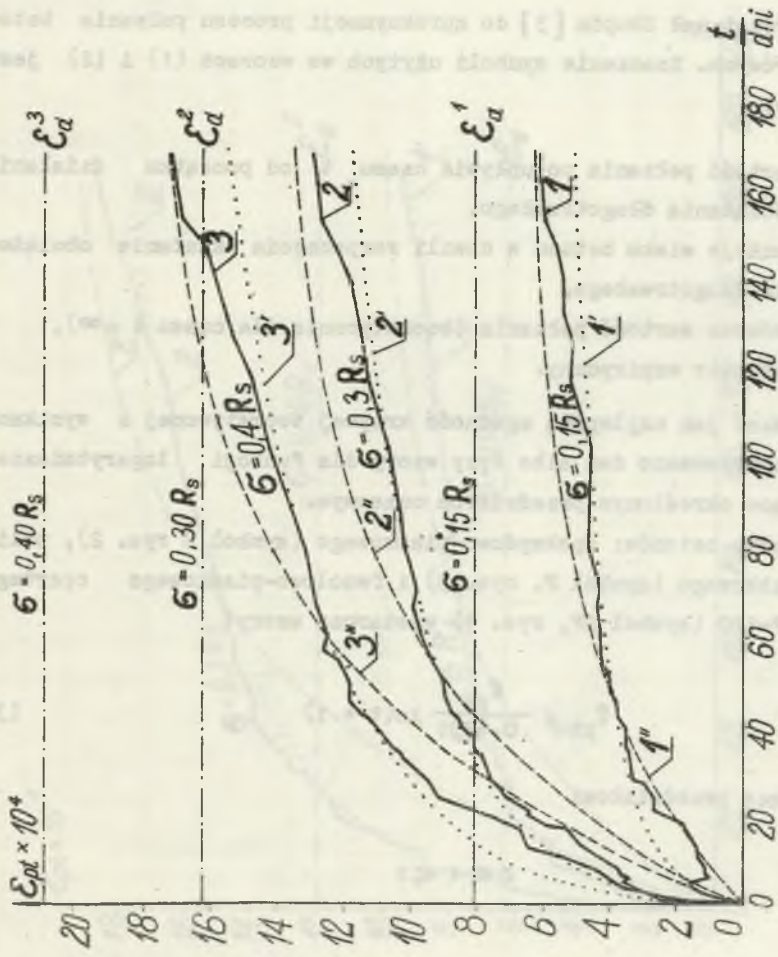
5. Odkształcalność betonów polimerowych pod obciążeniem długotrwałym

Obciążeniu długotrwałemu poddawano próbki w wieku 28 dni. Poziomy obciążenia dla poszczególnych par próbek dobierano tak, by wystąpiło w nich naprężenie $\sigma = 0,15 R_{s,g}$, $\sigma = 0,30 R_{s,g}$ lub $\sigma = 0,40 R_{s,g}$, gdzie $R_{s,g}$ oznacza wytrzymałość skupową lub wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. Empiryczne krzywe pełzania betonów polimerowych (linie ciągłe na rys. 2, 3 i 4) uzupełniono krzywymi teoretycznymi. Do ujęcia przebiegu pełzania w czasie wykorzystano funkcję logarytmiczną

$$\xi_{pt} = f(t_0) \ln(t + 1) \quad (1)$$



Rys. 1. Okształcenia betonów polimerowych pod obciążeniem doróżnym
 1,2 - beton epoksydowy, $\delta \leq 0,4 R_s$, 3,4 - beton poliestrowy, $\delta \leq 0,3 R_s$, 5,6 - beton fenolowy (FF),
 $\delta \leq 0,3 R_s$, 7,8 - beton fenolowy (FA), $\delta \leq 0,3 R_s$



Rys. 2. Pełzanie betonu epoksydowego

1, 2, 3 - krzywe empiryczne, 1', 2', 3' - krzywe logarytmiczne, $\sigma = 0,15 R_s$ i $\sigma = 0,30 R_s$ i $\sigma = 0,40 R_s$ - poziomy odkształceń doraźnych odpowiednio przy $\sigma = 0,15 R_s$, $\sigma = 0,30 R_s$ i $\sigma = 0,40 R_s$

omawianą przez Neville'a [2] oraz funkcję wykładniczą

$$\varepsilon_{pt} = \varepsilon_{pk}(1 - e^{-\alpha t}), \quad (2)$$

którą wykorzystywał Skupin [3] do aproksymacji procesu pełzania betonów polimerowych. Znaczenie symboli użytych we wzorach (1) i (2) jest następujące:

- ε_{pt} - wartość pełzania po upływie czasu t od początku działania obciążenia długotrwałego,
- $f(t_0)$ funkcja wieku betonu w chwili rozpoczęcia działania obciążenia długotrwałego,
- ε_{pk} - końcowa wartość pełzania (teoretycznie dla czasu $t = \infty$),
- α - parametr empiryczny.

Aby uzyskać jak najlepszą zgodność krzywej teoretycznej z wynikami pomiarów, zastosowano dwa albo trzy wzory dla funkcji logarytmicznej odpowiadające określonym przedziałom czasowym.

W przypadku betonów: epoksydowo-piaskowego (symbol E rys. 2), poli-estrowo-piaskowego (symbol P, rys. 3) i fenolowo-piaskowego opartego na żywicy F-110 (symbol FF, rys. 4) wystarczą wzory:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\varepsilon_{p1}}{0,6931} \ln(t + 1) \quad (3)$$

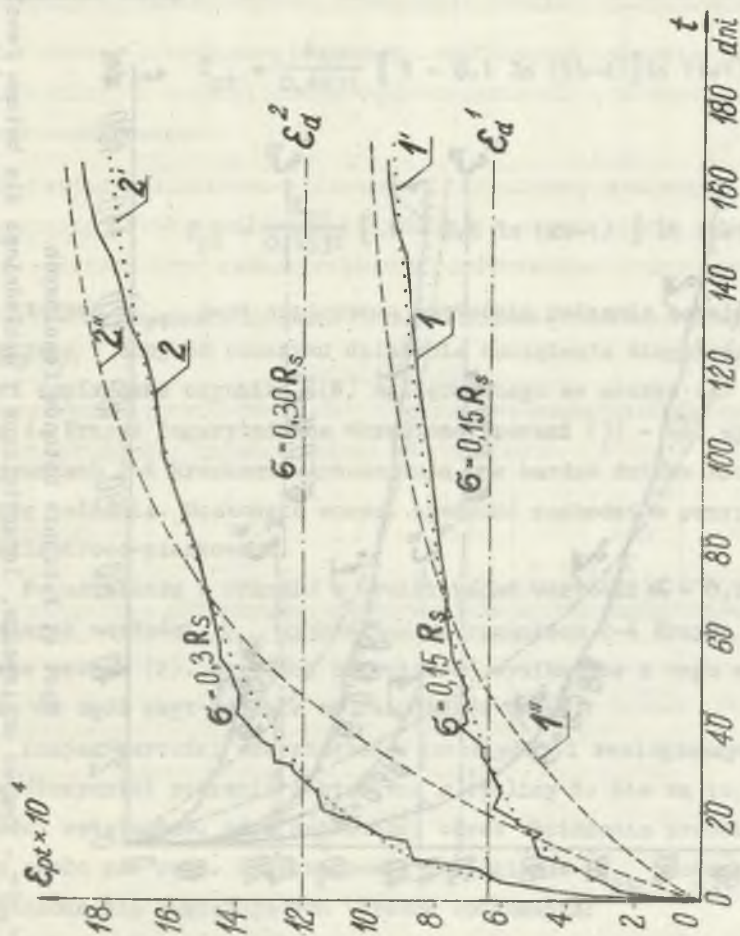
odpowiadający przedziałowi

$$0 \leq t \leq 1$$

oraz

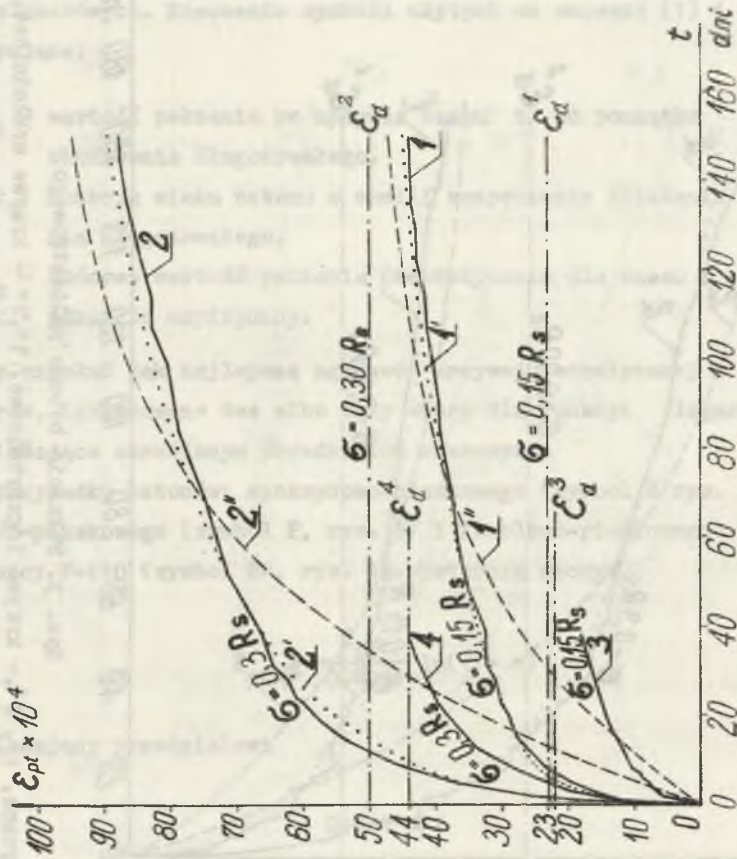
$$\varepsilon_{pt} = \frac{\varepsilon(6)}{10^4} \ln(t + 1)$$

ważny przy $t > 1$.



Rys. 3. Pełzanie betonu poliestrowego

1, 2 - krzywe empiryczne, 1', 2' - krzywe logarytmiczne, 1'', 2'' - krzywe wykładnicze, $\epsilon_d^1, \epsilon_d^2$ - odkształcenia doraźne przy naprężeniach $\sigma = 0,15 R_s$ i $\sigma = 0,30 R_s$



Rys. 4. Pełzanie betonów fenolowych

1, 2, 1', 2', 1'', 2'' - krzywe empiryczne, logarytmiczne i wykładnicze dla betonu fenolowego PA,
 3, 4 - krzywe empiryczne dla betonu fenolowego PF, E_d^i ($i = 1, 2, 3, 4$) - odkształcenia dorazne dla
 poszczególnych betonów, i poziomów naprężeń

W przypadku betonu fenolowo-piaskowego opartego na żywicy AG (symbol FA) zachowuje swą ważność wzór (3), natomiast wzór (4) jest przydatny dla $t > 28$ przy $\sigma = 0,15 R_s$ i dla $t > 14$ przy $\sigma = 0,30 R_s$. Przy $\sigma = 0,15 R_s$ i $1 \leq t \leq 28$ oraz $\sigma = 0,30 R_s$ i $1 \leq t \leq 14$ ważne są odpowiednio wzory

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\varepsilon_{p1}}{0,6931} [1 - 0,1 \ln(5t-4)] \ln(t+1) \quad (5)$$

i

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\varepsilon_{p1}}{0,6931} [1 - 0,1 \ln(2t-1)] \ln(t+1), \quad (6)$$

w których ε_{p1} jest empiryczną wartością pełzania zarejestrowaną po upływie 1 doby od początku działania obciążenia długotrwałego. Wartości empiryczne czynnika $\varepsilon(\sigma)$ występującego we wzorze (4) zawiera tabela 4. Krzywe logarytmiczne określone wzorami (3) - (6) wykreślono na rysunkach 2-4 kropkami. Aproksymują one bardzo dobrze rzeczywisty przebieg pełzania. Doskonała wprost zgodność zachodzi w przypadku betonu poliestrowo-piaskowego.

Po ustaleniu w parciu o wyniki badań wartości $\sigma_c = 0,02$ i poszczególnych wartości ε_{pk} wykreślono na rysunkach 2-4 krzywe wykładnicze dane wzorem (2). Wartości odkształceń wynikające z tego wzoru okazały się na ogół zbyt odległe od rezultatów badań.

Znając wartości odkształceń doraźnych i reologicznych obliczono współczynniki pełzania zestawione w tabelicy 5. Nie są to jeszcze wartości ostateczne, gdyż najdłuższy okres obciążenia próbek wynosi dopiero około pół roku. Odkształcenia reologiczne ε_{pk} podane w tabelicy 5 ustalono dla następujących okresów obciążenia:

- beton E, $t = 169$ dni,
- beton P, $t = 166$ dni,
- beton FA, $t = 150$ dni,
- beton FF, $t = 150$ dni.

Tablica 4

Empiryczne wartości $\xi(\sigma)$

Poziom naprężenia	Wartości $\xi(\sigma)$ dla betonów			
	E	P	FA	FF
$\sigma = 0,15 R_s$	1	1,83	9	4,7
$\sigma = 0,30 R_s$	2,3	3,51	18	12,4
$\sigma = 0,40 R_s$	3	-	-	-

Tablica 5

Odkształcenia doraźne, reologiczne i współczynniki pełzania

Poziom naprężenia	Rodzaj betonu							
	E		P		FA		FF	
	$\varepsilon_{pk}/\varepsilon_d$	φ	$\varepsilon_{pk}/\varepsilon_d$	φ	$\varepsilon_{pk}/\varepsilon_d$	φ	$\varepsilon_{pk}/\varepsilon_d$	φ
$\sigma = 0,15 R_s$	$\frac{6,1}{8,0}$	0,75	$\frac{9,6}{6,4}$	1,5	$\frac{45,0}{23,0}$	1,96	$\frac{23,6}{22,0}$	1,05
$\sigma = 0,30 R_s$	$\frac{12,8}{16,2}$	0,79	$\frac{18,8}{11,9}$	1,6	$\frac{88,0}{48,7}$	1,80	$\frac{62,2}{43,7}$	1,42
$\sigma = 0,40 R_s$	$\frac{17,1}{20,9}$	0,82	-	-	-	-	-	-

W przypadku betonu FF obliczono wartości ε_{pk} ze wzoru (4) wykorzystując dane z ostatniej kolumny tablicy 4.

Wyniki badań pełzania betonu fenolowo-keramzytowego przy ściskaniu oraz pełzania beleczek z betonów E, P i FF podane zostaną w oddzielnym opracowaniu.

6. Wnioski

6.1. Dla doświadczalnych betonów polimerowych zależność $\sigma - \xi$ jest w zakresie naprężeń $0 \div 0,3 R_s$ liniowa.

- 6.2. Przy jednakowych naprężeniach beton polimerowy wykazuje na ogół większe odształcenia doraźne niż porównywalny beton cementowy. Wynika to z różnicy modułów sprężystości.
- 6.3. Wstępne rozważania wykazują, że przebieg pełzania betonów polimerowych w czasie dobrze aproksymuje funkcja logarytmiczna.
- 6.4. Dla betonu epoksydowo-piaskowego współczynnik pełzania jest znacznie niższy od analogicznego współczynnika dla porównywalnego betonu cementowego.
- 6.5. Dla betonu poliestrowo-piaskowego i fenolowo-piaskowego opartego na żywicy F-110 współczynniki pełzania osiągać będą prawdopodobnie wartości tego samego rzędu co porównywalne betony cementowe.
- 6.6. Największe pełzanie wykazał beton fenolowo-piaskowy oparty na żywicy AG.
- 6.7. W przedziale $0 < \sigma \leq 0,4 R_s$ pełzanie betonów polimerowych jest w przybliżeniu liniowo zależne od naprężeń.

7. Literatura

1. Rüsç H.: Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone. Festigkeit und Verformung des exzentrisch gedrückten Rechteckquerschnittes aus unbewehrtem Beton kurzzeitiger Lasteinwirkung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 120. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin 1955.
2. Neville A.M.: Creep of Concrete: Plain, Reinforced, and Prestressed. North-Holland Publishing Company. Amsterdam 1970.
3. Skupin L.: Polymerové malty a plastbetony. Praha 1964.

DEFORMATIONS OF RESIN CONCRETES UNDER LONG-TIME LOADING

S u m m a r y

This paper deals with instantaneous and creep deformations of resin concretes. First, the strength and the modulus of elasticity were determined. The experimentally founded values of deformations are plotted in figures. For creep of resin concretes it were found logarithmic expressions which showed good agreement with experimental data. It also were determined creep coefficients ($\varphi_t = 150-180$) for these concretes.

FORMÄNDERUNGEN DER KUNSTHARZBETONE
BEI LANGZEITIGER LASTEINWIRKUNG

Z u s a m m e n f a s s u n g

Die beschriebenen Versuche betreffen die Formänderungen der Kunstharzbetone bei Kurzzeit - und Dauerstandbeanspruchung. Zuerst wurden die Festigkeit und der Elastizitätsmodul dieser Werkstoffe bestimmt. Die Messwerte der Verformungen sind in Bildern dargestellt. Neben den erfahrungsmässig ermittelten Kriechkurven sind auch die Diagramme der logarithmischen und exponentialen Kriechfunktionen gezeichnet. Für aktuelle Messwerte wurden die Kriechfaktoren bestimmt.