

Rafał SZYDŁOWSKI\*  
Politechnika Krakowska

## BADANIA PŁYT SPRĘŻONYCH PRZEZNACZONYCH NA NAWIERZCHNIE DRÓG I LOTNISK

**Streszczenie.** W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych 3 płyt o wymiarach  $1,0 \times 3,6 \times 0,16$  m. Dwie z nich zostały sprężone bezprzyczepnościowymi ciągnami stalowymi  $7\phi 5$  do 50% pełnej siły po 20 godzinach od zabetonowania oraz doprężone do siły docelowej 20 godzin później. Przez 28 dni mierzono odkształcenia betonu oraz siłę sprężającą. Równocześnie wykonano zestaw próbek betonowych, na których określono rozwój własności mechanicznych betonu w czasie.

## RESEARCH OF PRESTRESSED CONCRETE PLATES FOR ROADS AND AIRPORT PAVEMENTS

**Summary.** In this paper results of laboratory investigation of three  $1,0 \times 3,6 \times 0,16$  m concrete slabs have been presented. Two of them were prestressed by unbounded steel tendons  $7\phi 5$  to 50% of full prestressed force of 20 hours after concreting and prestressing force was improved to full value 20 hours later. The concrete strains and prestressed force were monitoring over 28 days. Set of concrete samples was cast in the same time, and development of concrete mechanical properties in day-time was determined.

### 1. Geneza problemu

Nośność oraz dopuszczalne obciążenie nawierzchni betonowej może być skutecznie zwiększone przez jej sprężenie. Sprężenie wywołuje w płycie betonowej naprężenia ściskające, które w znaczący sposób zmieniają charakter pracy nawierzchni oraz podnoszą jej rysoodporność. Zastosowanie sprężenia pozwala projektować niezarysowane, długie, ciągłe płyty o znacznie mniejszej grubości i większej długości niż podobne w wersji żelbetowej.

\* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. Politechniki Krakowskiej

W nawierzchniach betonowych wykonywanych z kilku bądź kilkunastometrowej długości płyt zdecydowanie najłabszym punktem całej konstrukcji są styki. Wiele uszkodzeń, takich jak nierównomierne osiadanie, erozja podłoża, zgniatanie i odhupywanie krawędzi ma miejsce właśnie w stykach płyt. Uszkodzenia te w znaczący sposób obniżają komfort ruchu. Skutecznie podnoszą również koszty związane z utrzymaniem nawierzchni. Jednym ze sposobów zmniejszenia uciążliwości wyżej wymienionych problemów jest zastosowanie betonu sprężonego. Poprawne projektowanie powinno prowadzić do otrzymania gładkiej, niezarysowanej nawierzchni z niewielką liczbą dylatacji.

Pomimo wyżej wymienionych zalet nawierzchnie z betonu sprężonego nie znalazły w świecie szerokiego zastosowania z kilku powodów:

- niewielu projektantów w dostatecznym stopniu poznało problem projektowania i konstruowania nawierzchni z betonu sprężonego,
- brak jest odpowiednich rozwiązań wykonawczych dla różnych obciążeń, uwzględniających różne warunki atmosferyczne,
- zastosowanie względnie wysokiego poziomu sprężenia w dwóch kierunkach (podłużnym i poprzecznym) okazało się zbyt drogie, co skutecznie ograniczało stosowanie betonu sprężonego w nawierzchniach drogowych i lotniskowych.

Wartość naprężeń sprężających i odpowiadającą im ilość stali można zredukować w stosunku do ilości używanej dotychczas, jeśli uwzględni się dwa następujące czynniki:

- zastosowanie warstw poślizgowych na styku nawierzchni z podłożem redukujących tarcie powstające w wyniku termicznej rozszerzalności płyty pozwoli znacząco zmniejszyć siłę oraz ilość stali sprężającej,
- rozkład naprężeń skurczowych na grubości płyty w wyniku różnicy wilgotności betonu na obu powierzchniach płyty redukuje naprężenia wywołane obciążeniem kołem pojazdu. Naprężenia ściskające na dole są przeciwne rozciągającym powstającym w wyniku lokalnego obciążenia płyty.

Jednym z problemów w projektowaniu jest określenie docelowych naprężeń i odkształceń w przekroju płyty, uwzględniających działanie sprężenia, zawartości wilgoci, czynników atmosferycznych i czasu. Jak powszechnie wiadomo, moduł sprężystości betonu jest wielkością zależną od wielu czynników, między innymi zawartości wilgoci oraz wartości i czasu trwania obciążenia. W tym celu należy uwzględnić w analizie skorygowaną wartość modułu sprężystości betonu. ACI Committee 209 w swojej interpretacji zagadnienia skurczenia i pęcznienia próbuje uprościć problem, wprowadzając efektywny moduł sprężający, którego

wartość zależy od ciecznego modułu sprężystości  $E_c$ , współczynnika pełzania  $\phi$  i współczynnika starzenia  $\chi$  wahającego się w granicach od 0,6 do 0,9.

$$\bar{E}_c = \frac{E_c}{1 + \chi \cdot \phi} \quad (1)$$

Pełzanie betonu zależy od zawartości wilgoci w betonie. Wilgotność betonu w głębszych warstwach z uwagi na ograniczenia w odparowywaniu wody jest na ogół znacznie większa niż przy górnej powierzchni płyty. Zgodnie z powyższym, w obliczeniach efektywnego modułu sprężystości do wyznaczania naprężeń wymuszonych należy stosować zmienny rozkład współczynnika pełzania na wysokości przekroju płyty.

## 2. Program badań

W Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej przeprowadzono wstępne badania poprzedzające wykonanie sprężonej, ciągłej płyty w skali naturalnej. Przedmiotem badań były stany odkształceń i naprężeń w przekroju poprzecznym płyty betonowej o wymiarach  $0,16 \times 1,0 \times 3,6$  m przy różnym stopniu sprężenia. Wykonano 3 płyty betonowe bez zbrojenia zwykłego. W celu zminimalizowania sił tarcia użyto dwóch warstw folii PE pomiędzy płytą a podkładem stalowym. Dwie z trzech płyt zostały sprężone stalowymi cięgnami bezprzyczepnościowymi  $7\phi 5$ . Płyta 1 sprężona została dwoma cięgnami w odstępnie 0,5 m. W przypadku płyty 2 zastosowano 4 cięgna w rozstawie 0,25 m. Widok ogólny płyty 1 przedstawia rysunek 1. Płyta 3 była niesprężona w celu monitorowania odkształceń skurczowych i termicznych, co pozwoliło odseparować odkształcenia od pełzania z odkształceń pomierzonych w płycie 2. Sprężenie realizowano w dwóch etapach: etap I – około 50 % docelowej siły sprężającej wprowadzono 20 godzin po zabetonowaniu, etap II – siła sprężająca została zwiększona do wartości docelowej po upływie kolejnych 20 godzin. Średnie wartości siły sprężającej oraz odpowiadające im wartości naprężeń w betonie zestawiono w tablicy 1. Do wykonania płyt użyto napowietrzanej mieszanki betonowej zaprojektowanej specjalnie dla konstrukcji sprężonych. Użyto cementu portlandzkiego CEM I MSR NA 42,5 w ilości  $440 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/c = 0,37$ . Ponieważ niezbędne było podniesienie modułu sprężystości betonu, zastosowano kruszywo bazaltowe. Zarówno przed, jak również podczas testów płyt prowadzono badania własności mechanicznych betonu i ich rozwój w czasie.

Tablica 1  
Średnie wartości siły sprężającej oraz odpowiadające im naprężenia obliczone dla dolnej ( $\sigma_{c,d}$ ) i górnej ( $\sigma_{c,g}$ ) powierzchni

Numer płyty	I etap sprężania			II etap sprężania		
	$P_{01}$ [kN]	$\sigma_{c,d}$ [MPa]	$\sigma_{c,g}$ [MPa]	$P_{02}$ [kN]	$\sigma_{c,d}$ [MPa]	$\sigma_{c,g}$ [MPa]
Płyta 1	100,1	1,72	0,78	189,9	3,26	1,48
Płyta 2	99,0	3,40	1,55	189,4	6,61	2,96

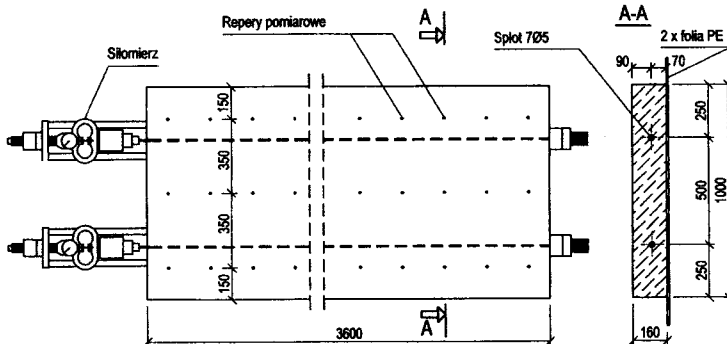
Po 12, 18, 24, 36 i 48 godzinach oraz 3, 7 i 28 dniach badano: wytrzymałość na ściskanie na kostkach sześciennych o boku 150 mm oraz walcach o średnicy  $\phi 150$  i wysokości 300 mm, wytrzymałość na zginanie przy dwupunktowym obciążeniu belek  $150 \times 150 \times 600$  mm, moduł sprężystości betonu określany na walcach  $\phi 150 \times 300$  mm oraz skurcz betonu na beleczkach  $100 \times 100 \times 500$  mm. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 2.

W trakcie testów płyty badano następujące wielkości:

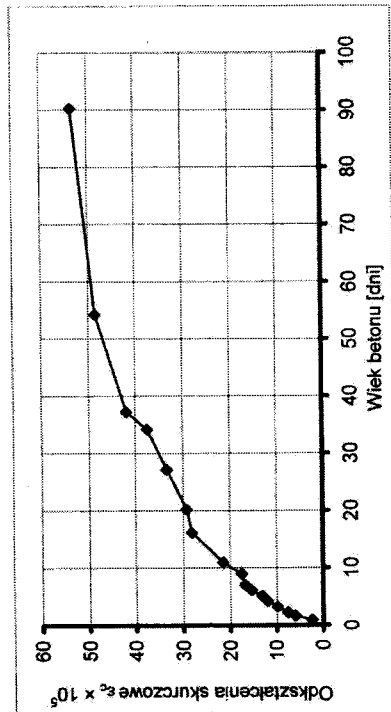
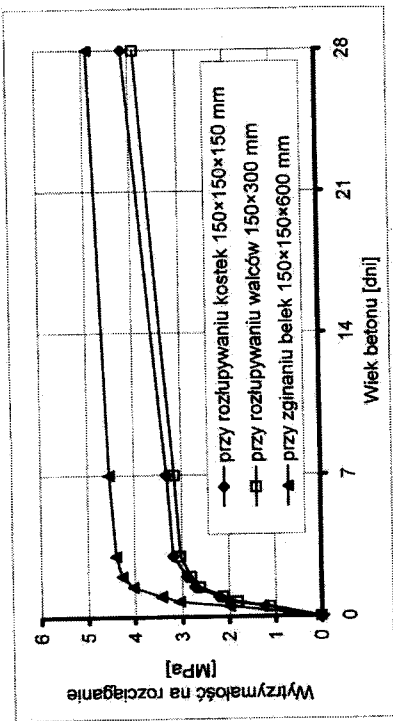
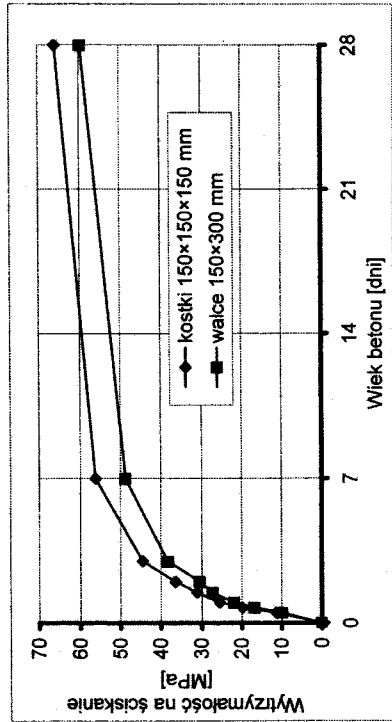
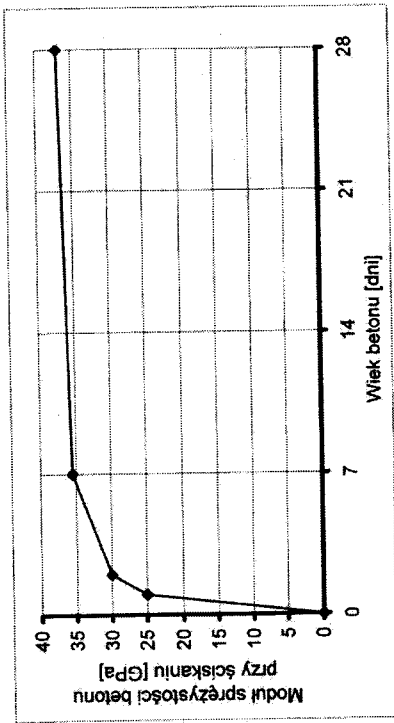
- siłę w ciągnach,
- odkształcenia oraz temperaturę betonu na trzech głębokościach: w środku wysokości, 20 mm poniżej górnej i 20 mm powyżej dolnej powierzchni płyty,
- odkształcenia betonu na górnej powierzchni w trzech liniach w kierunku podłużnym,
- skrócenie płyty na wysokości środka ciężkości sprężenia.

Siła sprężająca została zwolniona po 28 dniach od zabetonowania, lecz pomiary prowadzono jeszcze przez kilka dni. Wartości siły początkowej i końcowej oraz straty siły sprężającej zestawiono w tablicy 2.  $P_0$  oznacza początkową siłę w ciągnie,  $P_t$  siłę w ciągnie po 20 godzinach (dla I etapu) i po 28 dniach (dla II etapu). Ciężna sprężająca zostały usytuowane na mimośrodku 10 mm (rys. 1 i 4).

Wytrzymałość betonu na ściskanie w trakcie pierwszego etapu sprężania wynosiła 18,6 MPa (na próbkach walcowych), a w czasie drugiego (ostatecznego) 26,9 MPa.



Rys. 1. Widok ogólny płyty 1  
Fig. 1. General view of slab 1



Rys. 2. Rozwój własności mechanicznych i odkształceń skurcowych betonu w czasie  
 Fig. 2. Development of mechanical properties and shrinkage strains of the concrete in day-time

Tablica 2

Początkowe i końcowe wartości siły oraz straty sprężenia

Numer płyty	I etap sprężenia			II etap sprężenia		
	Start (20h)	Koniec (40h)	Straty siły	Start (40h)	Koniec (28 dni)	Straty siły
	$P_0$ [kN]	$P_t$ [kN]	$\Delta P$ [%]	$P_0$ [kN]	$P_t$ [kN]	$\Delta P$ [%]
Płyta 1	100,1	98,9	1,3	189,9	183,3	3,5
Płyta 2	99,0	96,7	2,3	189,4	182,9	3,4

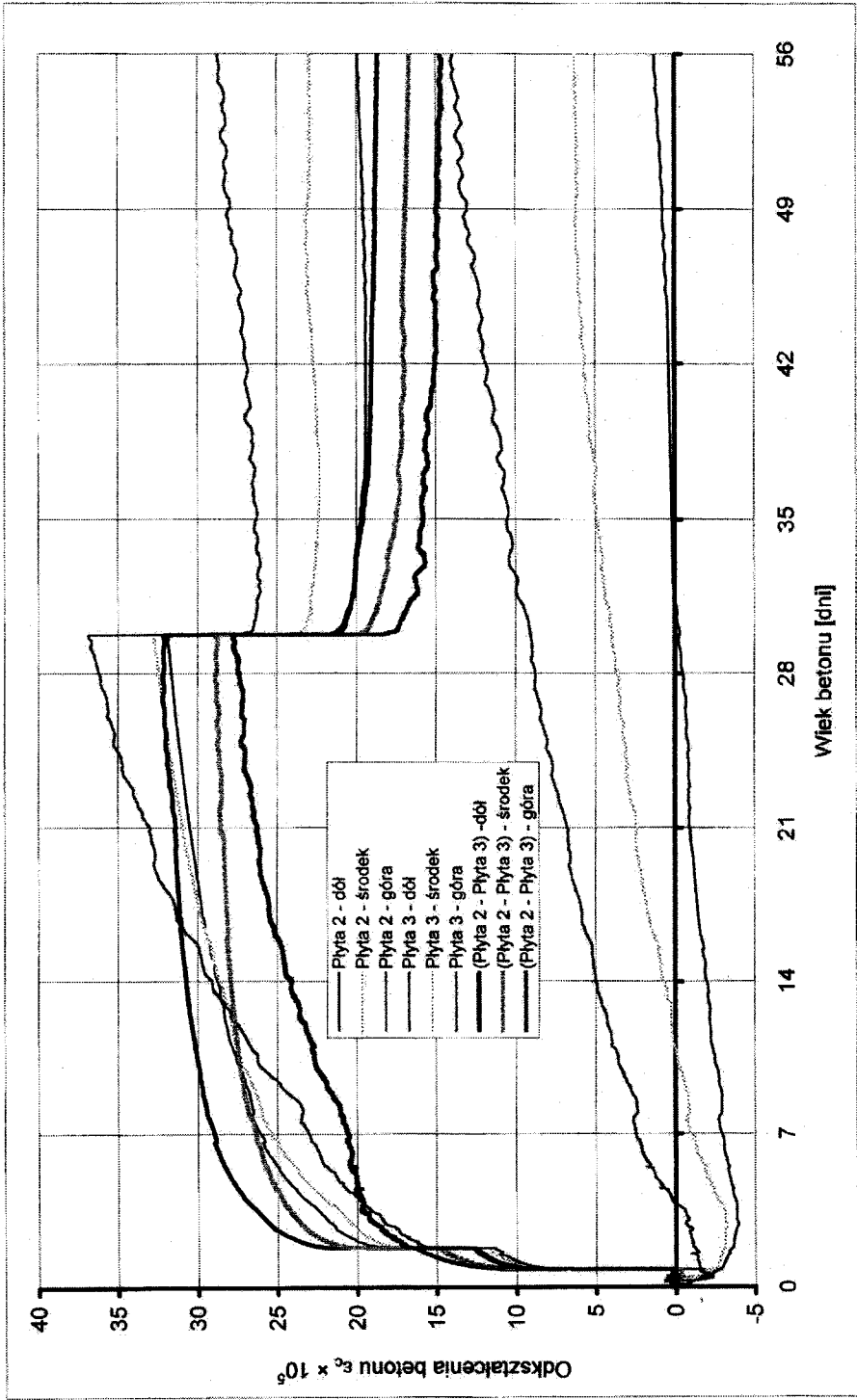
Sieczny moduł sprężystości wynosił 23 GPa, 28 GPa i 37,5 GPa po odpowiednio 24, 48 godz. i 28 dniach.

### 3. Omówienie wyników i wnioski końcowe

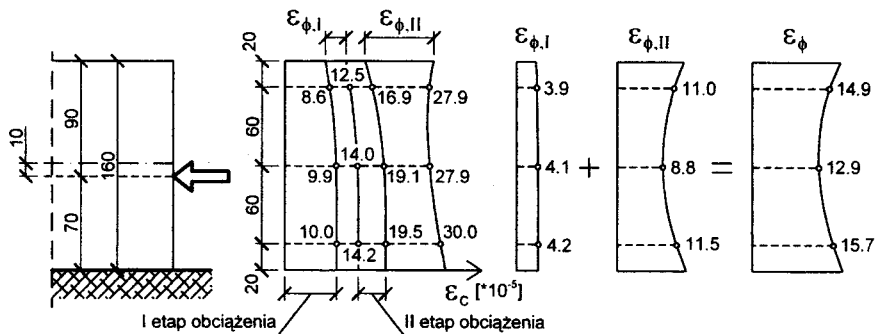
Rozkład odkształceń od skurczu i temperatury mierzonych na trzech głębokościach płyty 3 przedstawia dolna część rysunku 3. Natomiast kompletne odkształcenia wywołane skurczem, temperaturą i pełzaniem przedstawia górna część rysunku 3 (płyta 2). Rysunek ten prezentuje również odkształcenia od pełzania, obliczone jako różnicę odkształceń mierzonych na płytach 2 i 3 (linie grube). W oparciu o wartości odkształceń (doraźnych i opóźnionych) w trzech punktach wyznaczono ich rozkład w przekroju poprzecznym w każdym etapie sprężania i pomiędzy nimi (rys. 4).

Współczynnik pełzania  $\phi$  (równanie (1)) zależy od zawartości wilgoci w betonie, która jest różna na obu powierzchniach. Niestety, w badaniach nie było możliwości pomiaru wilgotności betonu do oszacowania efektywnego modułu sprężystości. Wartość modułu wyznaczono zatem znając naprężenia i odkształcenia betonu w czasie. Przyjmując do obliczeń naprężenia na górnej powierzchni płyty równe 2,96 MPa i odkształcenie (po 28 dniach) równe  $28,7 \times 10^{-5}$  (rys. 4), wyznaczono wartość efektywnego modułu sprężystości, otrzymano 10,3 GPa. Podobnie na dolnej powierzchni dla naprężeń 6,61 MPa i odkształceń  $31,0 \times 10^{-5}$  otrzymano moduł równy 21,3 GPa. Otrzymane wartości efektywnego modułu sprężystości są niższe niż sugerowane przez ACI Committee 325 dla określania rozkładu naprężeń w przekroju w czasie w wyniku sprężenia i odkształceń wymuszonych, w projektowaniu betonowych nawierzchni sprężonych. Należy podkreślić, że badania laboratoryjne nie uwzględniają czynników atmosferycznych.

Badania pokazały, że możliwe jest sprężanie betonu już po 20 godzinach po zabetonowaniu. W przypadku tak wczesnego sprężenia betonu z wysokim siecznym modułem



Rys. 3. Rozwój odkształceń betonu w czasie  
Fig. 3. Development of concrete strains in day-time



Rys. 4. Odształcenia doraźne oraz odształcenia od pełzania betonu w wyniku sprężenia  
 Fig. 4. Instantaneous and creep strains due to prestressing of Slab 2

sprężystości możliwe jest utrzymanie małych odształceń doraźnych. W badanym przypadku skrócenie płyty w wyniku sprężenia wyniosło 1,2 mm w pierwszym etapie i 0,62 mm w drugim etapie.

Dla oceny wpływu fałdowania, wpływów termicznych oraz dwukierunkowego sprężenia na deformację w czasie oraz straty siły sprężającej niezbędne są dalsze badania „in situ”.

## LITERATURA

1. Sargious M., Ghali A.: Stresses in Prestressed and Nonprestressed pavements and Slabs On Grade Due to Differential Shrinkage and Creep. ACI Journal, September-October 1986, p. 772-776.
2. ACI Committee 325: Recommendations for Designing Prestressed Concrete Pavements. ACI Structural Journal, July-August 1988, p. 451-471.
3. Kuś S., Ludera P., Łukaszyński J., Pietrzyk A., Bajorek G.: Sprężanie młodego betonu jako metoda eliminacji zarysowań termicznych i skurczowych ścian zbiorników żelbetowych. XLIV KN KILiW PAN i KN PZITB, Poznań-Krynica 1998, s. 121-128.
4. O'Brien J. S., Burns N. H., McCullough B. F.: Very Early Post-tensioning of Prestressed Concrete Pavements. ACI Structural Journal, November-December 1993, p. 658-665.
5. Kuś S., Woliński Sz.: Sprężanie młodego betonu jako metoda eliminacji zarysowań termicznych i skurczowych. Inżynieria i Budownictwo nr 6/99, s. 327-330.
6. Altoubath S. A., Lange D. A.: Tensile Basic Creep: Measurements and Behavior at Early Age. September-October 2001, p. 386-393.