ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z.104 Nr kol. 1695

Rafał SZYDŁOWSKI*
Politechnika Krakowska

ODKSZTAŁCENIA BETONU SPRĘŻONEGO W MŁODYM WIEKU

Streszczenie. Na skutek termicznej i skurczowej zmiany objętości beton skrępowany więzami zewnętrznymi i wewnętrznymi ulega zarysowaniu we wczesnej fazie dojrzewania. W pracy przedstawiono fragment podjętych w ramach pracy doktorskiej badań nad zastosowaniem sprężenia cięgnami bezprzyczepnościowymi jako metody zapobiegawczej. Przedstawiono wyniki odkształceń betonu, zmiany siły sprężającej w czasie w sprężonej jednokierunkowo płycie o wymiarach 1,0 × 3,6 × 0,16 m. Płyta sprężona została dwoma splotami 7ϕ5 mm w dwóch etapach po 20 i 43,5 godz. od zaformowania do średnich naprężeń odpowiednio 1,25 i 2,5 MPa. Omówiono wyniki oraz wnioski i zalecenia do dalszych badań.

STRAINS OF EARLY-AGE CONCRETE DUE TO PRESTRESS

Summary. In this paper the first stage of the research on the application of unbonded tendons to eliminate the thermal and shrinkage cracking of the early-age concrete has been presented. The concrete slab 1,0 × 3,6 × 0,16 m has been casted and prestressed by two unbonded steel tendons 7ϕ5 mm, 20 hours after concrete casting. The final value of initial prestressing force equal to 190 kN has been realized 43,5 hours from concrete casting. The concrete strains as well as the prestress force decrease have been presented and discussed. The final conclusion and the proposition for further investigation are presented.

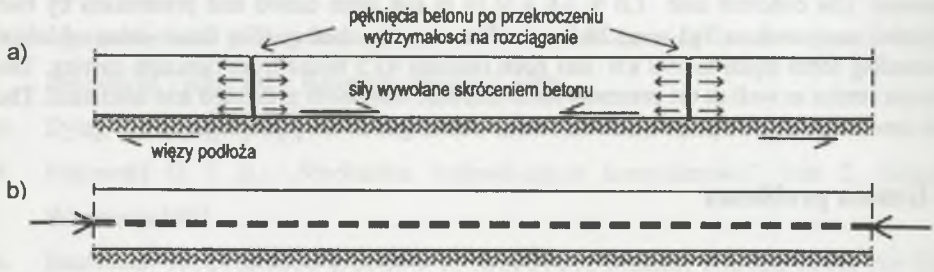
1. Geneza problemu

Trwający od połowy lat dziewięćdziesiątych XX w. renesans drogowych i lotniskowych nawierzchni betonowych wraz z nieustannymi pracami nad poprawą jakości i własności mechanicznych betonu stał się zaczątkiem do podjęcia prac badawczych zmierzających do wdrożenia i rozwoju bezstykowych, betonowych nawierzchni dróg i lotnisk w naszym kraju. Podstawową wadą betonu ograniczającą długość jednolitej konstrukcji betonowej bądź żelbetowej jest brak odpowiedniej wytrzymałości na rozciąganie. Na skutek zachodzących w procesie wiązania cementu zmian fizykochemicznych związanych z uwodnieniem cementu

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

w początkowej fazie dojrzewania betonu powstaje znaczna ilość ciepła powodująca zjawisko samonagrzewu betonu. Rozgrzewający się beton na skutek odkształceń termicznych zwiększa swoją objętość. Plastyczna mieszanka betonowa swobodnie ślizga się po podłożu oraz po zbrojeniu i odkształca poprzecznie. Wraz ze stopniowym twardnieniem betonu oraz przyrostem wytrzymałości powstają opory tarcia betonu po podłożu i względem zbrojenia. W rozszerzającym się w dalszym ciągu betonie na skutek krępujących więzów zewnętrznych (opory podłoża) i wewnętrznych (zbrojenie) powstają naprężenia ściskające – efekt samosprężenia. Po osiągnięciu przez beton najwyższej temperatury zaczyna się powolne jego schładzanie, czemu towarzyszy skracanie masy betonowej. Odkształcenia termiczne w połączeniu z intensywnym w tym okresie skurczem betonu bardzo szybko redukują powstałe naprężenia ściskające i prowadzą do narastania naprężeń rozciągających. Te z kolei, przy stosunkowo niskiej wytrzymałości na rozciąganie młodego betonu, prowadzą do powstania rys, czyli samozdylatowania konstrukcji betonowej (rys. 1).

Omówiony problem dotyczy również ścian zbiorników cylindrycznych i prostokątnych utwierdzonych w dnie. W szczególnym przypadku, zbiorników sprężonych, gdzie względy ochrony antykorozyjnej stali sprężającej eliminują możliwość ograniczenia samonagrzewu betonu przez zastosowanie cementu hutniczego, a sztywna płyta denna zbiornika stanowi poważne ograniczenie możliwości odkształceń ściany.



Rys. 1. Mechanizm zarysowania płyty betonowej na gruncie: a) płyta betonowa, b) płyta sprężona

Fig. 1. Mechanism of cracking of slab on ground: a) concrete slab, b) prestressed concrete slab

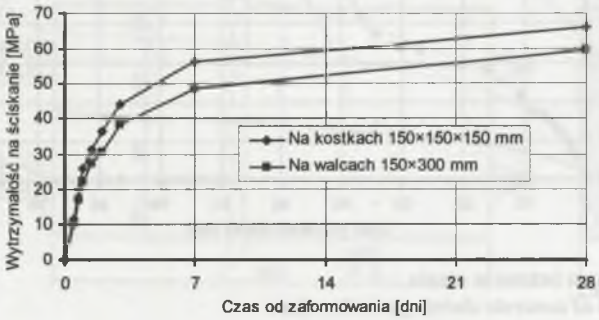
Jako metodę rozwiązania problemu proponuje się sprężenie młodego betonu cięgnami bez przyczepności i wprowadzenie pola odkształceń przeciwnego do tego powstającego w wyniku zmiany objętości betonu. W przypadku nawierzchni drogowych i lotniskowych zastosowane cięgna miałyby pracować również w fazie eksploatacji, docelowo jako cięgna z przyczepnością, jednak na skutek braku iniekcji cementowej na tym etapie konstrukcję traktować należy jako sprężoną kablami bez przyczepności. Z uwagi na docelową pracę cięgien

niezwykle istotne jest utrzymanie siły sprężającej na wysokim poziomie, co przy sprężaniu tak młodego betonu jest rzeczą trudną. Jednym z głównych parametrów decydującym o spadku siły sprężającej w czasie jest rozwój odkształceń w sprężonym w młodym wieku betonie.

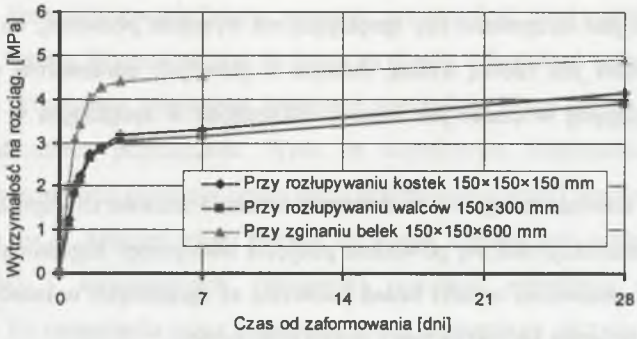
Brak danych doświadczalnych o zachowaniu betonu i zmianie siły sprężającej w czasie dla tego typu konstrukcji stał się powodem podjęcia niniejszego zagadnienia. W pracy tej zrelacjonowano i omówiono wyniki badań pierwszej ze sprężonych w młodym wieku płyt, jakie przewiduje program badawczy pracy doktorskiej autora.

2. Własności mechaniczne betonu i ich rozwój w czasie

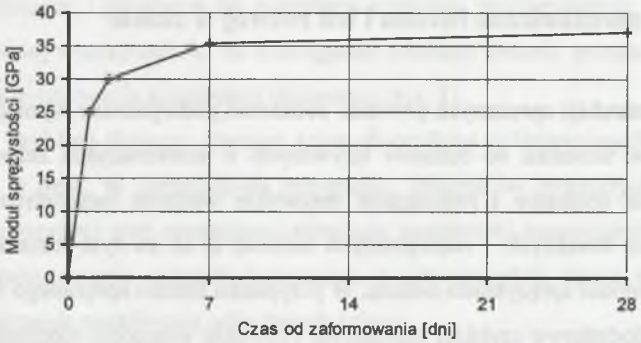
Beton do konstrukcji sprężonych powinny cechować podwyższone wymagania własności mechanicznych w stosunku do betonów używanych w konstrukcjach żelbetowych. Prócz wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie niezwykle ważnym parametrem decydującym o odkształceniach doraźnych i reologicznych betonu, a co za tym idzie o wartości siły sprężającej, jest moduł sprężystości betonu. W przypadku betonu sprężanego w młodym wieku wymaga się dodatkowo szybkiej kinematyki przyrostu własności mechanicznych w czasie. Odpowiednio wysokie parametry wytrzymałościowe we wczesnym okresie dojrzewania betonu umożliwiają wczesne wprowadzenie siły sprężającej i trwałe utrzymanie jej na wysokim poziomie. Do badań wybrano beton B45 na kruszywie bazaltowym o uziarnieniu do 16 mm, wykonany na cemencie CEM I MSR NA 42,5 w ilości 440 kg/m^3, w/c = 0,37. Wykonanie płyty poprzedzone zostało badaniami własności mechanicznych betonu po 12, 18, 24, 36, 48 godzinach, 3, 7 i 28 dobach od zaformowania próbek. Próbki oraz płyta dojrzewały



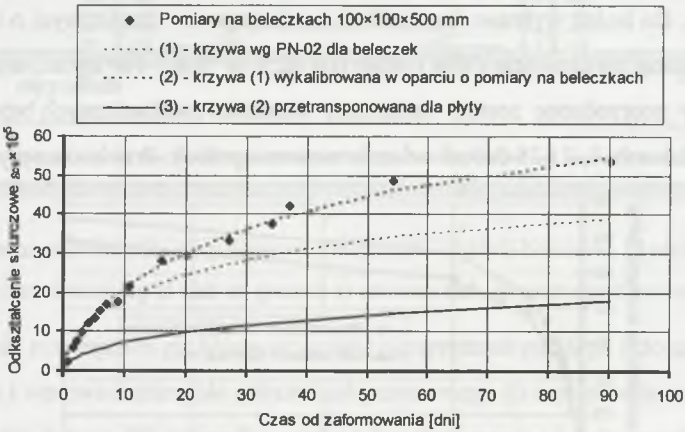
Rys. 2. Rozwój wytrzymałości betonu na ściskanie w czasie
Fig. 2. Development of concrete compressive strength in day-time



Rys. 3. Rozwój wytrzymałości betonu na rozciąganie w czasie
Fig. 3. Development of concrete tensile strength in day-time



Rys. 4. Rozwój modułu sprężystości betonu w czasie
Fig. 4. Development of concrete modulus of elasticity in day-time.

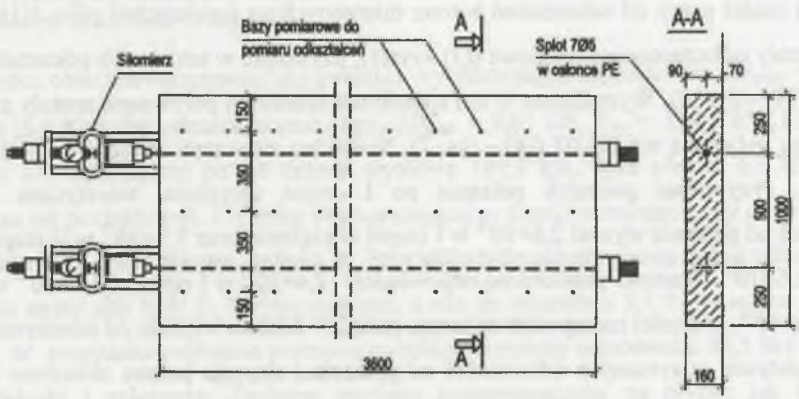


Rys. 5. Rozwój skurczu betonu w czasie
Fig. 5. Development of concrete shrinkage in day-time

w warunkach laboratoryjnych bez dodatkowych zabiegów zapobiegających parowaniu wody. Taki sam program badań zrealizowano na próbkach betonu wykonanych razem z płytą. Rozwój własności mechanicznych betonu oraz skurczu w czasie przedstawiono na rys. 2 ÷ 5.

3. Geometria płyty i program sprężenia

W Laboratorium Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej wykonano płytę o wymiarach 3,60 × 1,0 × 0,16 m (rys. 6). W celu zredukowania tarcia i eliminacji zarysowania płyta wylana została na 2 warstwach folii PE. W stalowej formie zastabilizowano dwie osłonki kablowe o średnicy wewnętrznej 30 mm w rozstawie 0,50 m. Po rozformowaniu płyty (20 h) do osłonek wprowadzono po jednym bezprzyczepnościowym splocie sprężającym 7ϕ5 mm. W celu wyeliminowania poślizgu stożka w zakotwieniu, co przy długości płyty 3,6 m zredukowałoby siłę sprężającą w kablu o prawie 20 %, zastosowano zakotwienia gwintowe wraz z zaciskami plastycznymi na splotach. Po stronie zakotwień biernych na kablach zainstalowano siłomierze pałąkowe. Sprężanie płyty zrealizowano w dwóch etapach: w pierwszym naciągając cięgna po 20 godz. od zabetonowania z siłą 99,9 i 100,3 kN (σ_c = 1,25 MPa), co stanowi 53% siły docelowej, w drugim doprężając po 43 godz. do sił 189,4 i 190,4 kN (σ_c = 2,37 MPa). Wprowadzona wartość naprężeń jest dopełnieniem niedoboru wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu w nawierzchniach lotniskowych. Czas sprężenia miał poprzedzać moment zarysowania nawierzchni



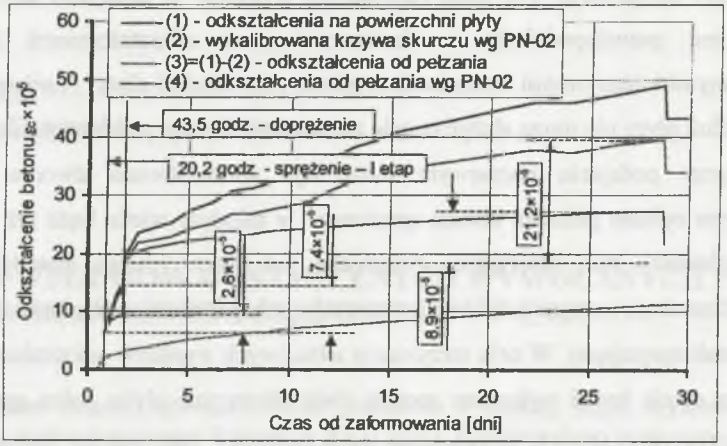
Rys. 6. Widok ogólny badanej płyty
Fig. 6. General view of slab under investigation

(wg literatury druga noc po zabetonowaniu) oraz gwarantować trwałe naprężenia ściskające w betonie. Podczas okresu obciążenia (28 dni) mierzono: zmianę siły sprężającej w czasie, odkształcenia betonu na górnej powierzchni czujnikiem nasadowym „DEMEC" o bazie 0,2 m, temperaturę betonu na 3 wysokościach przekroju oraz temperaturę powietrza.

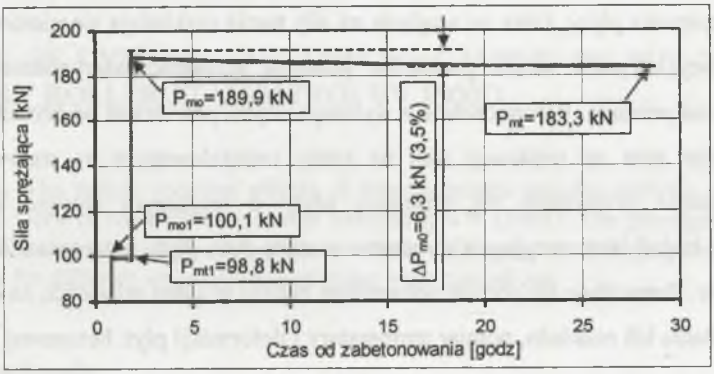
4. Omówienie wyników, wnioski, zalecenia i program dalszych badań

Jedną z niewiadomych, którą należało zbadać, była wartość odkształceń w płycie spowodowanych pełzaniem betonu sprężonego w młodym wieku. Doświadczalne pomiary odkształceń prowadzone były na powierzchni płyty i zawierały wpływ skurczu i pełzania betonu. Aby wydzielić odkształcenia od pełzania, należało określić rozwój odkształceń skurczowych betonu w płycie. W celu określenia rzeczywistych odkształceń skurczowych w betonie płyty postanowiono wykorzystać pomiary prowadzone na sześciu beleczkach 0,1×0,1×0,5 m czujnikiem nasadowym o bazie 0,4 m (rys. 5). Dlatego wykonano analityczne obliczenia odkształceń skurczowych wg PN-B-03264 (krzywa (1) - rys. 5) dla beleczek. Otrzymane wyniki badań aproksymowano krzywą wg PN-B-03264. W celu otrzymania najlepszej zgodności krzywej z wynikami badań zmodyfikowano normowy wzór, określający współczynnik β_{ds} (B.5) przez wprowadzenie wykładnika 0,65 w miejsce 0,5. Dokonano również kalibracji współczynnika β_{sc} zależnego od rodzaju cementu, przyjmując wartość równą 12. Otrzymano krzywą (2), opisującą w najlepszy sposób skurcz mierzony na próbkach, którą następnie przetransponowano dla płyty (miarodajny wymiar przekroju płyty h_0 = 242 mm)-krzywa (3). W dalszej części pracy od odkształceń betonu mierzonych na powierzchni płyty ((1) - rys.7) odjęte zostały odkształcenia skurczowe ((3) - rys.5), uzyskując w ten sposób odkształcenia od pełzania ((3) – rys. 7). Wyznaczone w ten sposób odkształcenia porównane zostały z krzywą teoretyczną obliczoną wg PN-02 ((4) - rys. 7). Nietrudno zauważyć znaczne rozbieżności w wynikach. Przyjmując początek pełzania po I etapie sprężenia, teoretyczna wartość odkształceń od pełzania wynosi $2{,}6\times10^{-5}$ w I etapie obciążenia oraz $8{,}9\times10^{-5}$ w II etapie, czyli łącznie $11{,}6\times10^{-5}$. Wartości pomierzone odpowiednio $7{,}4\times10^{-5}$ w I etapie, $21{,}2\times10^{-5}$ w II i łącznie $28{,}6\times10^{-5}$. Wartości rzeczywiste są zatem ponad 3- krotnie większe od pomierzonych.

Na podstawie otrzymanych odkształceń od pełzania i skurczu betonu obliczono wartość siły sprężającej po stratach opóźnionych oraz porównano z wartością pomierzoną. Straty siły obliczono wg PN-02. Początkowa siła sprężająca po doprężeniu wynosiła P_{m0} = 189,9 kN.



Rys. 7. Rozwój odkształceń betonu w czasie
Fig. 7. Development of concrete strains in day-time



Rys. 8. Przebieg siły sprężającej w czasie
Fig. 8. The prestress force in day-time

W wyniku obliczeń otrzymano: dla pełzania wyznaczonego z pomiarów: ΔP_{pm0} = 13,3 kN, P_{mt} = 176,6 kN; dla pełzania normowego: ΔP_{pm0} = 9,01 kN, P_{mt} = 180,9 kN. Rzeczywista wartość siły sprężającej po 28 dniach wyniosła 183,3 kN, była więc o 6,6 kN (3,5 %) mniejsza od początkowej. Przebieg siły sprężającej w czasie zarejestrowany na siłomierzach przedstawiono graficznie na rysunku 8. Przy doświadczalnym wyznaczeniu odkształceń od pełzania straty siły były 2- krotnie większe, a siła po stratach o 3,7 % mniejsza od pomierzonej. W przypadku podejścia normowego relacje wyniosły odpowiedni 36,5 % i 1,3 %.

Wnioski i zalecenia. Zarówno pomiary przeprowadzone na płycie, jak i normowe podejście do pełzania nie dają oczekiwanych rezultatów. Problemem jest brak jednoznacznych wyników doświadczalnych w zakresie pełzania betonu. Jedyną miarą ich poprawności

jest strata siły sprężającej. Tak duża rozbieżność wyników w podejściu doświadczalnym związana jest prawdopodobnie z nierównomiernymi odkształceniami skurczowymi spowodowanymi intensywnym wysychaniem górnej powierzchni płyty. Pomiary odkształceń na powierzchni płyty nie mogą służyć ocenie zachowania betonu pod obciążeniem. Odchyłka wyników przy podejściu normowym może być spowodowana dwoma czynnikami: niewłaściwym opisem pełzania betonu sprężonego w młodym wieku bądź też złym opisem zjawiska relaksacji stali sprężającej. Niezbędna jest zatem zmiana metodyki pomiarów i pomiar odkształceń na wysokości cięgien sprężających, jak również zbadanie doświadczalne relaksacji stali sprężającej. W celu otrzymania właściwych wyników odkształceń od pełzania w kolejnym etapie badań wykonane zostaną dwie identyczne płyty: jedna sprężona, druga betonowa. Na obu płytach prowadzone będą pomiary odkształceń betonu na trzech wysokościach przekroju środkowego oraz pomiary zmiany długości płyt na wysokości kabli sprężających. Dane o zmianie długości płyty zweryfikują odkształcenia betonu mierzone w połowie rozpiętości płyty, które ze względu na siły tarcia rozkładają się nierównomiernie na długości płyty. Wyniki takich pomiarów pozwolą otrzymać wiarygodniejsze wartości odkształceń od pełzania. Równocześnie z wykonywanymi pomiarami na płytach prowadzony będzie pomiar strat od relaksacji stali na kablu zainstalowanym na stalowej ramie. W kolejnym etapie przewiduje się zrobienie płyty o większym stopniu sprężenia. Po zakończeniu badań laboratoryjnych wykonane zostaną dwie płyty w terenie o długości kilkunastu metrów. Przewiduje się pomiar odkształceń betonu w kilku miejscach na długości płyty celem określenia ich rozkładu, pomiar temperatury i deformacji płyt: betonowej i sprężonej.

LITERATURA

1. 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.
2. O'Brien J. S., Burns N. H, McCullough B F.: Very Early Post-tensioning of Presteressed Concrete Pavements, ACI Structural Journal, November-December 1993, s. 658-665.
3. Kuś S., Woliński Sz.: Sprężanie młodego betonu jako metoda eliminacji zarysowań termicznych i skurczowych. Inżynieria i Budownictwo nr 6/99, s. 327÷330.
4. Altoubath S. A., Lange D. A.: Tensile Basic Creep: Measurements and Behavior at Early Age, September-October 2001, s. 386-393.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Szczepan Woliński