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

Andrzej SMAGA*
Politechnika Krakowska

NAWIERZCHNIE DROGOWE Z BETONU SIARKOWEGO

Streszczenie. W niniejszej pracy przedstawiono informacje na temat technologii wykonywania nawierzchni z betonu siarkowego (BS), a także rezultaty własnych badań własności mechanicznych betonu siarkowego oraz wyniki badań płyty z BS o wymiarach 0,16x1,0x3,6 m sprężonej dwoma cięgnami bezprzyczepnościowymi 7ø5 mm.

SULFUR CONCRETE ROAD PAVEMENT

Summary. In the paper there are presented some information dealing with preparation of subbase or surface to receive sulfur concrete, batching, transporting placing and finishing. Additionally the mechanical properties of sulfur concrete resulted of own investigations: compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity in compression and sulfur concrete to sulfur concrete joint capacity in direct tension are also given. Moreover the results of experimental investigations carried out on prestressed sulfur concrete slab 1,0 x 3,6 x 0,16m with two unbonded tendons 7ø5mm type are summarized.

1. Warunki wykonania i układania betonu siarkowego

Beton siarkowy nie jest nowym materiałem. Już w początkach XX wieku prowadzono badania nad zastosowaniem siarki jako spoiwa wiążącego kruszywo. Korzystnymi cechami betonu siarkowego są: wysokie wytrzymałości, szybkość wiązania, niska nasiąkliwość, wysoka odporność na szeroką gamę kwasów i soli oraz możliwość recyklingu.

Najważniejszym wymaganiem przy wykonywaniu nawierzchni z betonu siarkowego jest zapewnienie suchej powierzchni kontaktowej z podłożem, które winno być pozbawione powierzchniowych uszkodzeń, dobrze związane lub zagęszczone. Przy względnie suchym podłożu można zastosować warstwę wyrównawczą z suchego piasku grubości 50 do 100 mm.

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Andrzej Seruga

W przypadku wilgotnego podłoża należy zastosować warstwę ochronną z polietylenu lub podobnego materiału parochronnego ułożonego na piasku, w celu zredukowania odparowania wody w momencie układania gorącej mieszanki betonowej [1].

Beton siarkowy produkowany jest przez zmieszanie kruszywa podgrzanego do temperatury 177÷204°C ze zmodyfikowanym spoiwem siarkowym i miałkim wypełniaczem mineralnym. Podgrzane kruszywo stapia spoiwo siarkowe i ogrzewa wypełniacz mineralny. Temperatura mieszanki betonu siarkowego jest kontrolowana z uwagi na fakt, że spoiwo siarkowe topi się w temperaturze 119°C, a powyżej temperatury 149°C lepkość betonu siarkowego gwałtownie wzrasta, przez co mieszanka staje się nieurabialna. Beton siarkowy przegrzany powyżej 149°C sztywnieje i ma suchy wygląd. W takim wypadku nie należy poprawiać składu mieszanki przez dodanie spoiwa, lecz szybko obniżyć temperaturę poniżej 149°C - jeśli ilość spoiwa była pierwotnie prawidłowo dobrana, to beton wróci do bardziej płynnej konsystencji. Z dotychczasowych badań i realizacji wynika, że temperatura rzędu 132÷141°C jest optymalna dla uzyskania czasu potrzebnego do transportu i ułożenia mieszanki oraz wykończenia powierzchni przed stwardnieniem.

Typowe urządzenie do układania betonu siarkowego powinno zawierać:

- system osuszania kruszywa,
- wagę do dozowania składników mieszanki,
- sprzęt do mieszania i transportu gotowej mieszanki,
- typowe narzędzia do ręcznego rozprowadzania betonu i wykończenia powierzchni.

Składniki BS winny być dozowane w następującej kolejności: podgrzany piasek i kruszywo; spoiwo siarkowe; wypełniacz mineralny; włókna (jeśli są stosowane). Mieszanka betonowa musi być dokładnie wymieszana, tak aby stopione spoiwo siarkowe dokładnie otaczało kruszywo drobne i grube oraz wypełniacz mineralny. Należy ograniczyć do minimum segregację kruszywa. Do betonowania można stosować zarówno formy drewniane, jak i metalowe. W przypadku stosowania form metalowych powtarzalnych winny być one podgrzewane w celu uniknięcia wiązania betonu z powodu błyskawicznego stygnięcia w kontakcie z zimną formą.

Beton siarkowy może być zbrojony stalą zbrojeniową, stalą zbrojeniową powlekaną żywicą lub włóknem szklanym. Szczegóły dotyczące stosowania stali zbrojeniowej w betonie portlandzkim ujęte odpowiednimi normami są zalecane do stosowania również w przypadku betonu siarkowego [1]. Otulenie stali winno być nieznacznie zwiększone, by uniknąć trudności w betonowaniu, spowodowanych oziębieniem betonu przez stal. Innym

rozwiązaniem jest podgrzewanie form i stali zbrojeniowej bezpośrednio przed ułożeniem mieszanki. Włókno szklane wprowadzane do mieszanki skutecznie zapobiega powstawaniu rys skurczowych, poprawia plastyczność i udarność betonu siarkowego. W pracy [1] zaleca się stosowanie włókna szklanego długości 13÷38 mm w ilości 8,5 do 11,4 kg/m^3 betonu siarkowego.

Mieszankę należy wylać tak szybko jak to możliwe, aby wykończenie powierzchni mogło być wykonane, gdy beton jest jeszcze dostatecznie gorący. Zagęszczenie i wykańczanie nawierzchni z betonu siarkowego może być wykonywane za pomocą narzędzi używanych do układania betonów cementowych. Beton siarkowy winien być mieszany w tak dużej masie, jak to jest tylko możliwe, aby utrzymać ciepło. Maksymalne wymiary betonowanych nawierzchni (płyt) ograniczone są przez umiejętności i możliwości ekipy wykonującej płytę z mieszanki betonu siarkowego, dopóki jest ona jeszcze dostatecznie gorąca. Przy właściwie zaprojektowanej mieszance wibratory buławowe nie są konieczne, do zagęszczania mieszanki w zupełności wystarcza sztychowanie. W celu uzyskania szczelnej i wygładzonej powierzchni zaleca się stosowanie listwy wibracyjnej Duży wpływ na postęp prowadzonych prac mają panujące warunki otoczenia. W przypadku układania nawierzchni grubości 50 mm pozostaje 2÷10 minut czasu na jednorazowe wykończenie powierzchni, zanim rozpocznie się jej twardnienie. W przypadku nawierzchni grubości 100 do 200 mm ten czas wydłuża się do 5÷20 minut. W momencie powstania skorupy na powierzchni górnej nie należy kontynuować zacierania. Można użyć palnika gazowego do szybkiego roztopienia powierzchni i ponownego jej wykończenia.

W związku z ograniczonymi możliwościami układania mieszanki konieczne jest stosowanie przerw roboczych, które umożliwiają odkształcenia termiczne i skurczowe. Przerwy robocze o szerokości 6÷9 mm powinny sięgać na głębokość ok. 20÷25% grubości płyty. Stosowane są także przerwy dylatacyjne szerokości 10÷13 mm w celu ograniczenia naprężeń termicznych. Maksymalna odległość między dylatacjami nie powinna przekraczać 18 m przy prawidłowo wykonanej mieszance betonowej. Jeśli zawartość siarki jest większa niż 18% (wagowo), to odległość ta winna być odpowiednio zmniejszona. Jak wynika z przeprowadzonych badań [2,3], podczas wykonywania płyty o wymiarach 3,1x17,0x0,089 m całkowite skrócenie płyty wynosiło 19 mm.

2. Badania doświadczalne i otrzymane wyniki

Celem badań było opracowanie technologii wykonania odcinka próbnego nawierzchni z zastosowaniem sprężenia. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano skład mieszanki z betonu siarkowego na kruszywie granitowym, o krzywej uziarnienia do 16 mm. Jako spoiwo zastosowano siarkę modyfikowaną w ilości wagowej 19%. Określona doświadczalnie gęstość pozorna betonu siarkowego wynosi 2373 kg/m^3. Wyliczona zawartość pustek powietrznych w betonie wynosi 3,44%.

Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie (kostki 150x150x150 mm) wynosi 54,9 MPa i 64,4 MPa odpowiednio po 1 i 28 dniach. Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe (walce ø150x300 mm) wynosi odpowiednio 2,35 MPa i 4,22 MPa. Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu (belki 150x150x600 mm) wynosi 7,0 MPa i 8,80 MPa (po 1 i 28 dniach). Moduł sprężystości przy ściskaniu (walce) na poziomie obciążenia $0{,}4\sigma_c$ wynosi odpowiednio 24,0 GPa i 27,4 GPa. Badania zespolenia betonu siarkowego z betonem siarkowym pod obciążeniem statycznym przeprowadzono na próbkach walcowych wykonanych w dwóch seriach, różniących się czasem zespolenia (po 2h i 4h). Średnie naprężenie przyczepności przy osiowym rozciąganiu wynosiło 2,69 MPa dla czasu zespolenia 2h i 3,16 MPa dla 4h. Można stąd wnioskować, że układanie nawierzchni z betonu siarkowego z zachowaniem dłuższych przerw roboczych korzystniej wpływa na nośność zespolenia. Styk jest bowiem poddany mniejszym naprężeniom rozciągającym wynikającym z procesu schładzania obu segmentów.

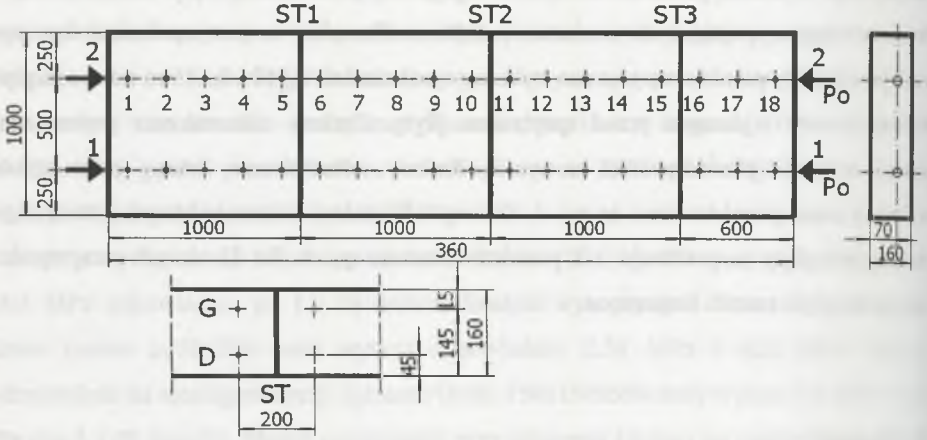
Poniżej przedstawiono wyniki badań dla płyty o grubości 0,16 m, szerokości 1,0 m i długości 3,6 m od momentu jej sprężenia do rozprężenia i fazy po rozprężeniu. Betonowanie zrealizowano etapami wykonując 3 poprzeczne styki na całą grubość płyty w rozstawie co 1,0 m. Kolejne segmenty płyty układane były po przerwie 1,5h. Nie stosowano żadnej obróbki termicznej powierzchni zespolenia. Po upływie 24 godzin od rozpoczęcia formowania płytę sprężono dwoma cięgnami bezprzyczepnościowymi 7ø5 mm w rozstawie co 0,5 m, na mimośrodzie 0,01 m w kierunku spodu płyty. Naciąg przeprowadzono jednocześnie za pomocą agregatu firmy PAUL, w każdym cięgnie wprowadzono siłę P_0=190,0 kN.Naprężenie ściskające w płycie od sprężenia wynosiło 2,35 MPa. Na obu cięgnach zainstalowano siłomierze pałąkowe o zakresie do 200 kN. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1. Pomiar temperatury twardniejącego betonu przeprowadzono za pomocą czujników wtopionych w 3 stykach płyty oraz w środku jednego segmentu płyty na głębokości cięgien sprężających. Maksymalną temperaturę mieszanki

zarejestrowano na czujniku 2 (w środku płyty) w momencie jego zabetonowania (64,5°C). Po dwóch dobach temperatura betonu zrównała się z temperaturą otoczenia. Przebieg zmian temperatury w czasie pokazano na rys. 5. Na górnej powierzchni płyty naklejono repery w osiach cięgien sprężających w rozstawie 0,20 m. Ponadto, na powierzchniach bocznych naklejono punkty pomiarowe poprzez styki na wysokościach 0,045 i 0,145 m od spodu płyty. Pomiar zerowy wykonano przed sprężeniem płyty. Zmiany odkształcenia poprzecznego styku 1 w czasie przedstawiono na rys. 2. Zmiany odkształcenia betonu poza stykami w funkcji czasu przedstawiono na rys. 3. Zmiany odkształceń betonu w bazach pomiarowych na długości płyty w przekroju 1-1 przedstawiono na rys. 4. Po 31 dniach utrzymywania obciążenia płyta została rozprężona.

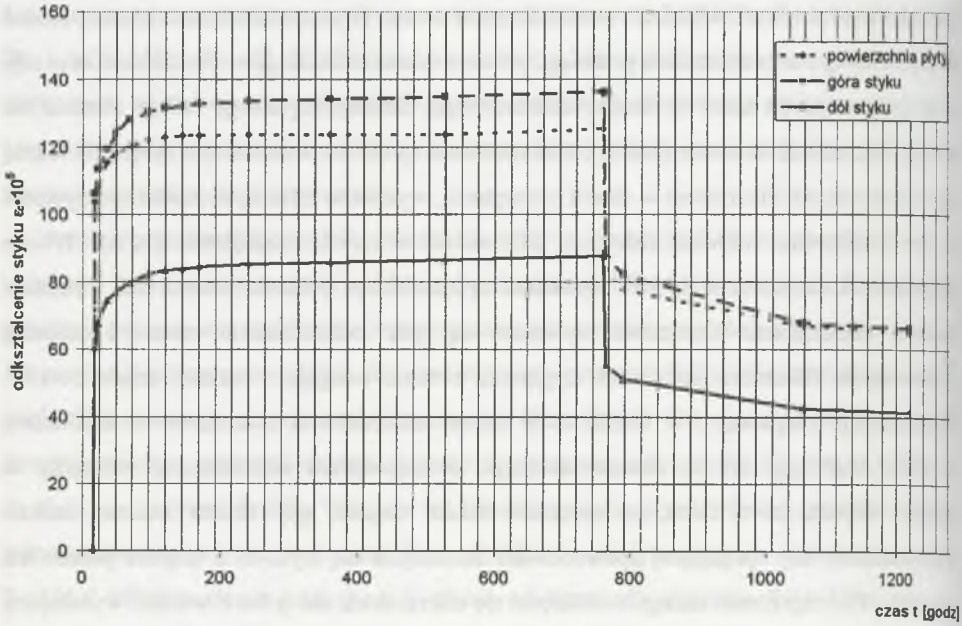
3. Wnioski

Beton siarkowy można sprężać po 24 godzinach już pełną wartością docelowej siły, co nie jest możliwe w przypadku betonów cementowych. Wynika to z bardzo szybkiego początkowego przyrostu własności mechanicznych betonu (wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości itp.) oraz charakteru przebiegu procesu skurczu. Skutkuje to obniżeniem strat siły sprężającej w porównaniu do betonu cementowego. Szczególną uwagę należy zwrócić na zmiany odkształceń w czasie (rys. 3.). Odkształcenia sprężyste w momencie sprężenia różnią się nieznacznie od odkształceń w chwili rozprężania, wynika to z faktu, że moduł sprężystości w chwili sprężenia niewiele różni się od modułu w chwili rozprężenia (10%). Trwałe odkształcenia na poziomie $15 \cdot 10^{-5}$ wywołane są zjawiskiem pełzania betonu. Jak wykazały badania, odkształcenia skurczowe wywołane są tylko ochładzaniem betonu i zachodzą w pierwszych kilkunastu godzinach stygnięcia betonu, osiągając wartości rzędu $50 \cdot 10^{-5}$. Po stabilizacji temperatury w czasie 24 h dalsze odkształcenia skurczowe są minimalne ($1 \cdot 10^{-5}$). Analizując rys. 4., można zauważyć, że największe odkształcenia wystąpiły w stykach. Wynika to z faktu, że sprężenie miało miejsce, gdy skurcz betonu zanikał. Wprowadzenie siły sprężającej spowodowało zaciśnięcie się styków, a dopiero potem ich sprężenie. Po rozprężeniu nastąpiło cofnięcie się odkształceń, ale tylko o wartość wynikającą z naprężenia ściskającego, pozostała część odkształcenia jest odkształceniem trwałym, wynikającym z zamknięcia się styków. Całkowity spadek siły sprężającej w czasie utrzymywania obciążenia nie przekroczył 3% siły początkowej. Na podstawie analizy

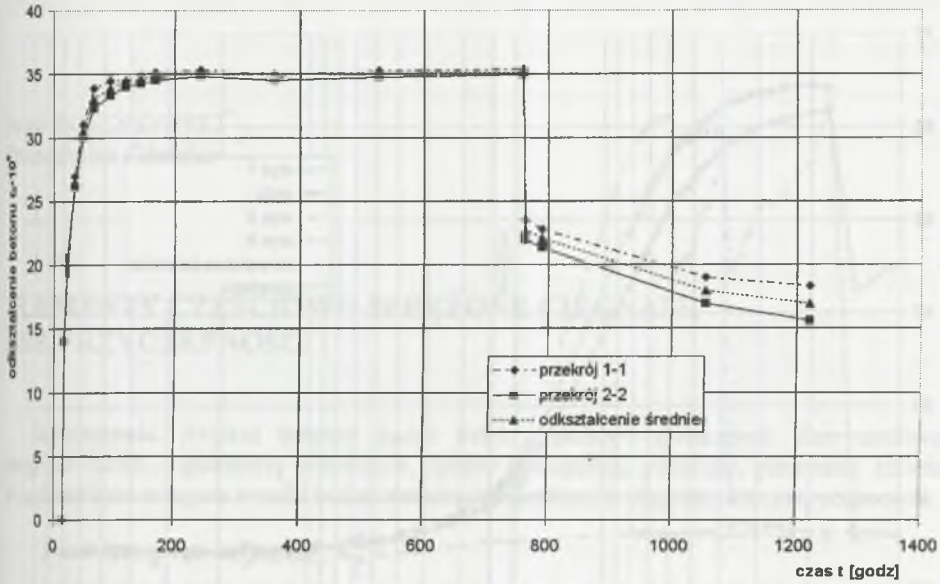
wyników można stwierdzić, że sprężenie nawierzchni z betonu siarkowego wpłynie korzystnie na ich walory eksploatacyjne.



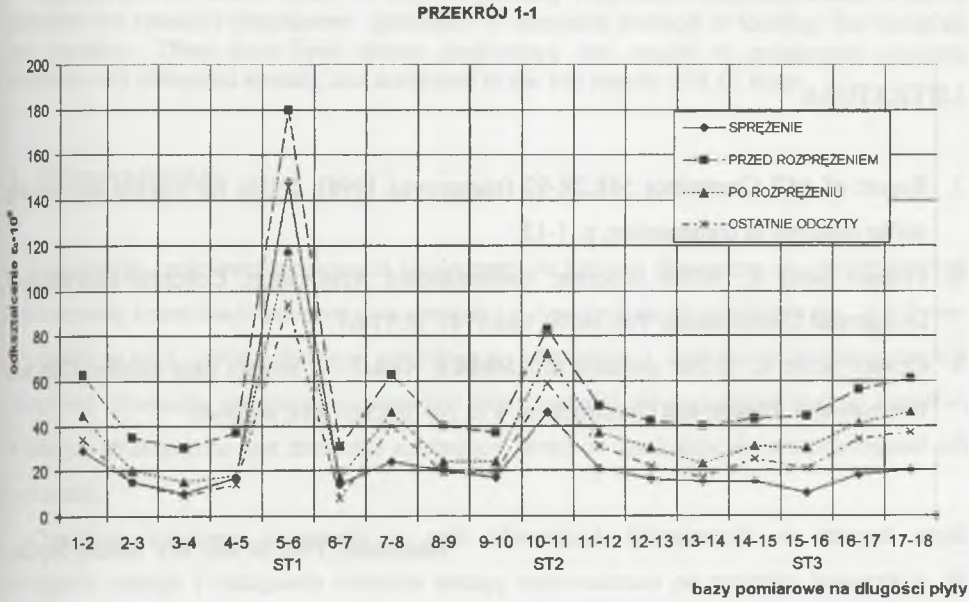
Rys. 1. Schemat badanej płyty
Fig. 1. Scheme of investigated slab



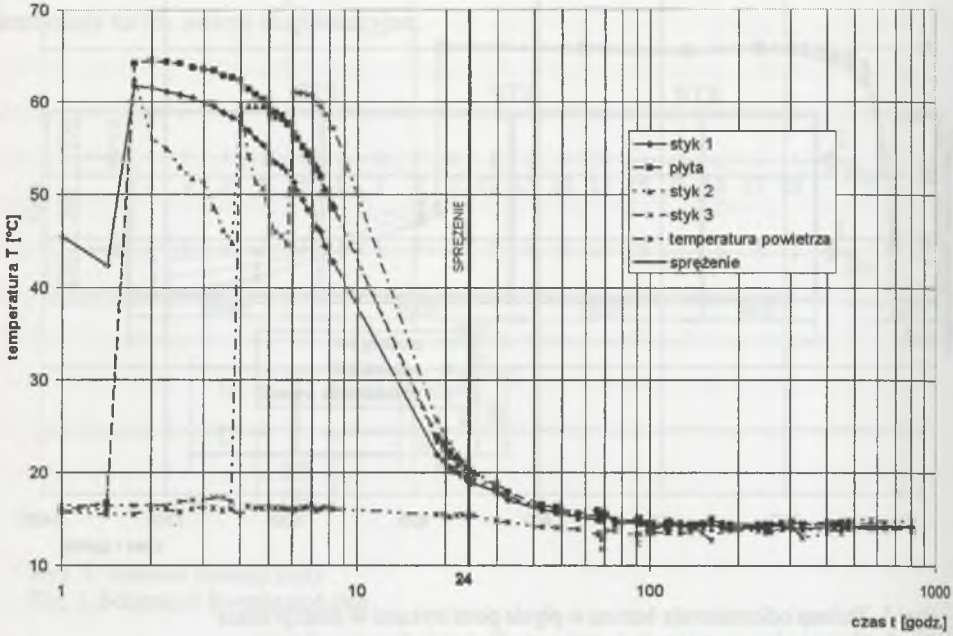
Rys. 2. Zmiana odkształcenia styku 1 w funkcji czasu
Fig. 2. Change of first joint strain in function of time



Rys. 3. Zmiana odkształcenia betonu w płycie poza stykami w funkcji czasu
Fig. 3. Change of concrete strain in slab out of joints in function of time



Rys. 4. Zmiany odkształceń betonu w bazach pomiarowych na długości płyty
Fig. 4. Change of concrete strain in measuring bases longways the slab



Rys. 5. Zmiany temperatury płyty w funkcji czasu
Fig. 5. Change of slab temperature in function of time

LITERATURA

1. Report of ACI Committee 548.2R-93 (reapproved 1998): Guide for mixing and placing sulfur concrete in construction, p. 1-12.
2. Pickard Scott S.: Sulfur concrete: Understanding Application. Concrete International: Design and Construction, V.3, No10, Oct.1981, p. 57-67.
3. Pickard Scott S.: Sulfur concrete at AMMAX Nickel – a project case history. Concrete International: Design and Construction, V.6, No10, Oct.1984, p. 35-41.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Antoni Szydło