

Technologia budowy konstrukcji masywnych z betonu

Piotr Witakowski¹

1. KONSTRUKCJE MASYWNE

W ostatnich kilkudziesięciu latach rozwój środków technicznych, jakimi dysponuje budownictwo umożliwił wznoszenie wielkich obiektów z betonu w bardzo krótkim czasie. Nie rzadko układa się obecnie nawet ponad 500 m³ betonu w czasie jednej zmiany roboczej. Tak szybkie tempo budowy ujawniło w całej pełni problemy znane uprzednio tylko przy budowie wielkich zapór wodnych z betonu. Problemy te wynikają z faktu, że dojrzewanie betonu jest wynikiem hydratacji cementu, która stanowi proces egzotermiczny. Orientacyjnie pełna hydratacja 1 kg zwykłego cementu portlandzkiego powoduje wydzielanie się około 400 kJ ciepła. Wydzielające się ciepło hydratacji podnosi temperaturę betonu tym bardziej, im trudniejsze jest odprowadzanie ciepła na zewnątrz. W skrajnych przypadkach może to doprowadzić do zagotowania się dojrzewającej masy betonowej, a powstające w betonie naprężenia termiczne mogą być przyczyną pęknięć przebiegających przez cały przekrój betonowanego elementu. Ponieważ odprowadzanie ciepła hydratacji jest tym trudniejsze, im większe są rozmiary betonowanego bloku, więc niebezpieczeństwo uszkodzeń na skutek naprężeń termicznych jest tym większe, im bardziej masywna jest konstrukcja. Dla konstrukcji o prostych kształtach masywność możemy utożsamiać z jej grubością. Dla porównywania masywności konstrukcji o złożonych kształtach można posłużyć się jedną z następujących miar.

A. Współczynnik masywności konstrukcji $m_k = \frac{S}{V}$,

gdzie: V – objętość elementu,

S – powierzchnia elementu.

Przyjmuje się, że konstrukcja ma dużą masywność, jeśli $m_k < 2$ [m⁻¹], średnią - jeśli $m_k \in [2, 15]$ [m⁻¹] i małą, jeśli $m_k > 15$ [m⁻¹].

Współczynnik m_k uwzględnia tylko geometrię konstrukcji. W przypadku, gdy chłodzona jest tylko część powierzchni, trafniejszą miarą niebezpieczeństwa wywołanego przez ciepło hydratacji jest

¹ dr hab. inż., Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

B. Współczynnik masywności pozornej $m_p = \frac{S_p}{V}$,

gdzie - S_p – powierzchnia elementu chłodzona przez otaczające powietrze, który uwzględnia geometrię i chłodzenie lub

C. Grubość zastępcza $e = \frac{V}{S_p}$,

a dla elementów pryzmatycznych

D. Grubość zastępcza $e_m = \frac{2F}{U_z}$,

gdzie: F - pole przekroju poprzecznego elementu,

U_z - długość obwodu (przekroju poprzecznego), przez który następuje kontakt z powietrzem.

Podkreślić trzeba, że problem naprężeń termicznych wywołanych ciepłem hydratacji nie ogranicza się tylko do konstrukcji masywnych, lecz występuje zawsze, gdy utrudnione jest odprowadzanie ciepła. W szczególności obserwujemy często uszkodzenia termiczne w stosunkowo cienkich elementach, które zostały wykonane z bogatych w cement mieszanek dojrzewających w warunkach izolacji termicznej. Dzieje się tak ze względu na fakt, że istnieją dwa odmienne mechanizmy zniszczenia konstrukcji w wyniku ciepła hydratacji. Pierwszy z nich występuje w okresie nagrzewania konstrukcji (w okresie *uderzenia termicznego*) i związany jest z rozciąganiem powierzchniowych warstw bloku przez rozszerzające się w wyniku nagrzewania wnętrze. Mówimy wówczas o *rozciąganiu bezpośrednim*. Drugi mechanizm pojawia się w okresie ostygnięcia bloku i związany jest z powstrzymywaniem odkształceń stygnącego wnętrza przez powierzchniowe warstwy bloku lub zewnętrzne warunki podparcia. Mówimy w tym przypadku o *powstrzymywaniu odkształceń* (ang. *restraint mechanism*). Jeśli pierwszy z mechanizmów możliwy jest tylko przy dużych grubościach bloku, to drugi z nich może wystąpić niezależnie od grubości.

2. SPECYFICZNE PROBLEMY BUDOWY KONSTRUKCJI MASYWNEJ

Jest oczywiste, że naprężenia termiczne wywołane ciepłem hydratacji są tym większe, im większy jest przyrost temperatury we wnętrzu dojrzewającej konstrukcji. W szczególności - w konstrukcji, w której nie ma zmian temperatury naprężenia termiczne w ogóle nie pojawią się. Budowa konstrukcji masywnej z betonu różni się od budowy zwykłej konstrukcji tym, że technologia musi uwzględniać konieczność minimalizowania wzrostu temperatury w wyniku samonagrzewu konstrukcji.

Dla zapewnienia tego celu przy budowie konstrukcji masywnych z betonu obowiązują trzy podstawowe zasady:

- 1) receptura betonu powinna zostać dobrana tak, aby do wnętrza konstrukcji wprowadzać jak najmniej ciepła hydratacji (utajonego w cemencie),
- 2) wprowadzone już do konstrukcji ciepło hydratacji powinno wydzielać się jak najwolniej - daje to czas na odprowadzenie ciepła na zewnątrz konstrukcji,
- 3) wydzielające się wewnątrz konstrukcji ciepło hydratacji powinno mieć jak najmniejszą drogę do przebycia - odprowadzanie ciepła wywoła wówczas mały przyrost temperatury.

Stosowanie tych zasad zapewnia, że dojrzewanie konstrukcji z betonu związane jest z możliwie niskim wzrostem temperatury w jej wnętrzu, a co za tym idzie minimalizuje naprężenia termiczne.

Podkreślenia wymaga fakt, że szybkość wydzielania się ciepła hydratacji zależy wyraźnie od temperatury, w jakiej przebiega proces i szacunkowo rośnie 2-krotnie przy wzroście temperatury o 10 °C. Toteż jednym z zasadniczych sposobów spowalniania procesu wydzielania ciepła jest obniżenie temperatury.

3. MONOLITYCZNOŚĆ KONSTRUKCJI I CZYNNIKI TECHNOLOGICZNE

Zwykle zadanie, jakie stoi przed technologiem budowy konstrukcji masywnej sprowadza się do opracowania receptury betonu oraz sposobu wykonania konstrukcji, która ma gotowy projekt. Oznacza to, że receptura i sposób wykonania muszą być dostosowane do z góry zadanych rozmiarów, kształtu i sposobu podparcia zaprojektowanej konstrukcji. Receptura i sposób wykonania muszą zapewniać zachowanie monolityczności konstrukcji. Przy określonych projektem własnościach konstrukcji zachowanie monolityczności zależy od:

- 1) rozwoju pola temperatury $T(t)$,
- 2) odkształcalności termicznej betonu (λ betonu $\approx \lambda$ kruszywa),
- 3) rozwoju pola własności mechanicznych $E(t)$, $\nu(t)$, $R_c(t)$ oraz
- 4) koincydencji między rozwojem pola temperatury i pola własności wytrzymałościowych.

Technologia budowy konstrukcji masywnych z betonu wykształciła w ciągu ostatnich dziesięcioleci szereg czynników technologicznych mających na celu zapobieżenie utracie monolityczności na skutek naprężeń termicznych wywołanych ciepłem hydratacji. Czynniki te podzielić można na 3 grupy.

- A. Czynniki dostępne w czasie wykonywania mieszanki betonowej.
- B. Czynniki dostępne w czasie betonowania.
- C. Czynniki dostępne w czasie pielęgnacji.

Czynniki dostępne w czasie wykonywania mieszanki betonowej

Na czynniki tej grupy należą składają się:

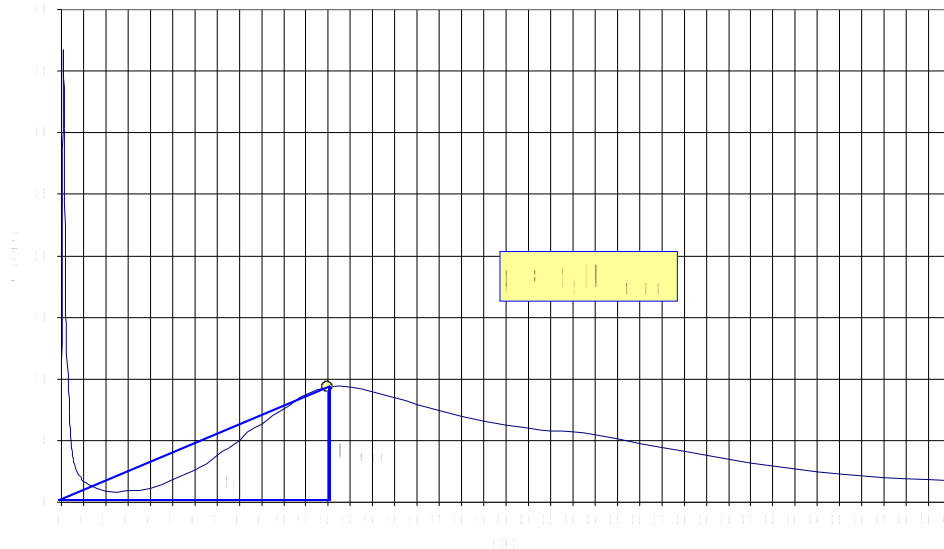
- skład recepturowy mieszanki i
- jej temperatura początkowa.

Zasadniczym czynnikiem tej grupy jest rodzaj cementu. Dla potrzeb budowy konstrukcji masywnych cement powinien mieć możliwie niskie całkowite ciepło hydratacji, a sama jego hydratacja powinna przebiegać możliwie wolno. Tempo hydratacji cementu charakteryzuje *funkcja źródeł* $W(t)$ - rys. 1 i 2 - tj. gęstość mocy ciepła hydratacji (jej wartości mierzone są w W/g i wskazują, ile w danej chwili wydziela się ciepła w jednostce czasu z jednostki masy cementu). Dla porównywania przydatności poszczególnych spoiw warto posługiwać się tzw. współczynnikiem przydatności p zdefiniowanym wzorem

$$p = \frac{t_1}{W_{\max}},$$

gdzie: W_{\max} - wartość maksimum krzemianowego na funkcji źródeł w ustalonej temperaturze,

t_1 - czas wystąpienia maksimum krzemianowego.



Rys. 1. Współczynnik przydatności. Funkcja źródeł dla cementu portlandzkiego 42,5 Rejowiec. Badanie przeprowadzono na zaczynie przy $w/c = 0,5$. Temperatura $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ponieważ w cemencie głównym składnikiem wydzielającym ciepło hydratacji jest klinkier, cement zwykle ma tym większy współczynnik przydatności, im mniej zawiera klinkieru. Najwyższą preferencję ma więc cement typu CEM III B (hutniczy), a najniższą CEM I (portlandzki). Ponadto należy dobrać cement z klinkieru o składzie mineralogicznym wynikającym z następującej relacji między ciepłami hydratacji poszczególnych minerałów

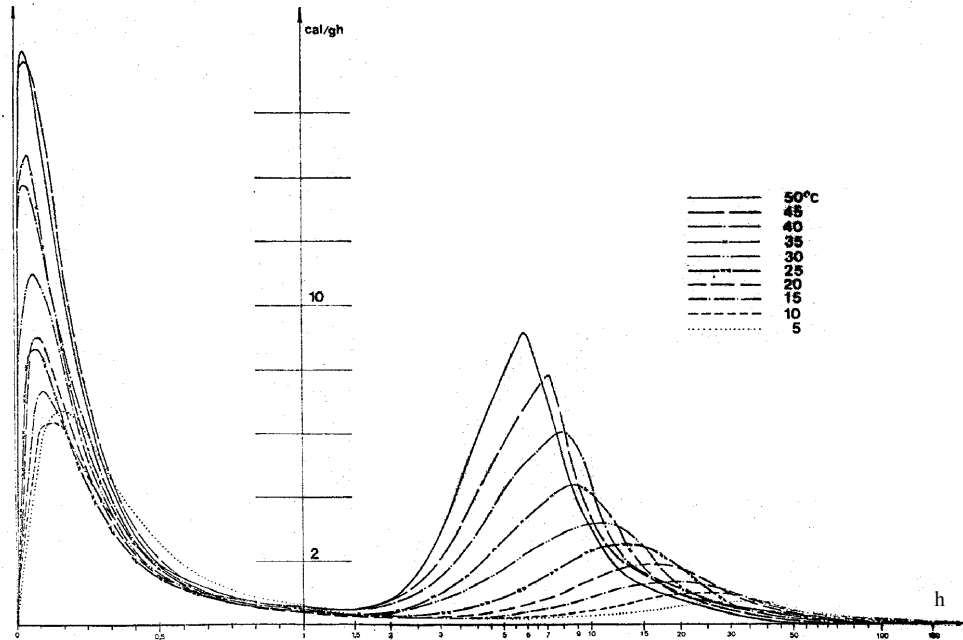
$$Q_{C_3A} : Q_{C_3S} : Q_{C_4AF} : Q_{C_2S} = 10 : 5 : 1 : 1.$$

Oznacza to, że cement do budowy konstrukcji powinien być wykonany z klinkieru o jak najmniejszej zawartości C_3A i C_3S .

Współczynnik przydatności cementu portlandzkiego rośnie wraz ze spadkiem zawartości gipsu (najwyższy współczynnik ma czysty klinkier) i stopniem hydrofobizacji (cement zleżały ma większy współczynnik p niż cement świeży), a maleje wraz ze wzrostem powierzchni właściwej S_w - cement niższej klasy ma zwykle większy współczynnik p niż cement wyższej klasy wykonany z tego samego klinkieru.

Niezależnie od własności samego cementu na ilość ciepła wydzielającego się w betonie ma oczywisty wpływ zawartość cementu w betonie, a ponadto tempo wydzielania ciepła hydratacji zależy od rodzaju kruszywa - kruszywo powinno mieć jak największe ciepło właściwe i współczynnik przewodności - oraz od temperatury mieszanki. Wpływ temperatury ilustruje rysunek 2. W zakresie przydatnych w technologii współczynników w/c tempo hydratacji zależy od tego współczynnika bardzo nieznacznie.

Niezależnie od wpływu ww. klasycznych składników betonu, szybkość hydratacji w betonie może być w bardzo szerokich granicach regulowana przez domieszki chemiczne. W obecności superplastyfikatora cement wykazuje zwykle znacznie większy współczynnik przydatności cementu niż bez jego obecności, a stosowanie opóźniaczy pozwala właściwie na dowolną zmianę współczynnika przydatności.



Rys. 2. Zależność funkcji źródeł od temperatury. Badanie w kalorymtrze izotermicznym skonstruowanym pod kierunkiem autora. Cement portlandzki 45 Małogoszcz, $w/c = 0,5$.

Pamiętać jednak należy, że powyżej pewnej granicy wszystkie znane opóźniacze jedynie przesuwają w czasie cały efekt krzemianowy (zwiększają tzw. okres indukcji), co nie ma żadnego znaczenia dla wartości przyrostów temperatury i wielkości naprężeń termicznych.

Czynniki dostępne w czasie betonowania

Do tej grupy zaliczamy te czynniki, które mogą być przedmiotem decyzji technologa w odniesieniu do czynności przygotowawczych wykonywanych na placu budowy przed betonowaniem lub bezpośrednio dotyczących sposobu układania betonu. Czynniki te zwykle określane są mianem technologii betonowania.

Najważniejszym czynnikiem jest tu podział na bloki betonowania określane często jako *system betonowania*. Wyróżnia się 6 podstawowych systemów:

- 1) przewiązkowy,
- 2) słupowy,
- 3) długich bloków,
- 4) wysokich bloków,
- 5) pasmowy,
- 6) dywanowy.

Każdy z tych systemów związany jest z innym kształtem i konfiguracją przestrzenną poszczególnych bloków betonowania [1].

Innym ważnym czynnikiem jest ustalenie sposobu chłodzenia wewnętrznego (ang. *pipe cooling*). Wiąże się z tym konieczność zaprojektowania i wykonania instalacji chłodzącej. Warto wspomnieć, że metoda ta została po raz pierwszy zastosowana przy

budowie zapory Hoovera w USA w latach 1931÷1935. W Polsce zastosował ją po raz pierwszy autor przy budowie Mostu Świętokrzyskiego w Warszawie w roku 1999.

Do innych czynników z tej grupy zalicza się strefowanie betonu, harmonogram i tempo betonowania oraz przygotowanie termiczne podłoża. Strefowanie betonu polega na przyjęciu różnej receptury dla różnych fragmentów tego samego obiektu, a nawet elementu celem zmniejszenia dozowania cementu w tych miejscach, gdzie dopuszczalne to jest ze względów wytrzymałościowych. Harmonogram i tempo betonowania powinny być dobrane tak, aby uzyskać możliwie niską temperaturę początkową mieszanki. Należy unikać betonowania konstrukcji masywnych latem, a jeśli takie betonowanie jest konieczne, należy je prowadzić po zmroku.

Harmonogram i tempo betonowania pozwalają też na takie rozłożenie w czasie układania kolejnych bloków betonowania, aby zminimalizować naprężenia termiczne pojawiające się na skutek różnej temperatury sąsiadujących ze sobą bloków, a jednocześnie w pełni wykorzystać możliwość chłodzenia na powierzchni poszczególnych bloków. Zwykle sprowadza się to do określenia czasu, po jakim na danym bloku można zabetonować blok następny. Podobny cel mają również metody przygotowania termicznego podłoża. Najczęściej stosuje się je dla podniesienia temperatury powierzchni uprzednio wykonanego i wystudzonego bloku, aby zmniejszyć różnice temperatur w stosunku do bloku, który ma być na nim zabetonowany.

Czynniki dostępne w czasie pielęgnacji

Wyróżnia się tu 3 metody pielęgnacji termicznej:

- 1) chłodzenie powierzchniowe,
- 2) chłodzenie wewnętrzne – rurowe (*pipe cooling*),
- 3) izolacja termiczna - deskowanie.

Chłodzenie powierzchniowe ma na celu możliwie szybkie odprowadzenie ciepła celem zapobieżenia nadmiernym przyrostom temperatury wewnątrz bloku i wynikłym stąd naprężeniom termicznym. W warunkach braku swobody odkształceń konstrukcji nie należy dopuszczać do przyrostów temperatury wyższych niż 20 °C. Chłodzenie powierzchniowe zwykle realizuje się przez polewanie powierzchni bloku chłodną wodą. Jest to metoda, która w polskich warunkach klimatycznych może być skutecznie stosowana przy grubościach nie przekraczających 1 m. Grubość graniczna zależy od wielu okoliczności (rodzaju cementu, dozowania, temperatury początkowej mieszanki itp.). Dla betonów konstrukcyjnych wykonywanych z cementu portlandzkiego latem nie powinno się stosować bloków betonowania o grubości większej od 60 cm.

Przy większych grubościach chłodzenie powierzchniowe musi być wsparte chłodzeniem wewnętrznym warstw głębiej położonych. Służąca do tego celu instalacja powinna być wykonana z rur stalowych i umieszczona w bloku równocześnie z montażem zbrojenia. Przez instalację tą w czasie pielęgnacji powinna płynąć stale woda chłodząca. Projekt instalacji powinien być poparty obliczeniami termicznymi. Ważne jest, aby instalacja ta została uruchomiona przed rozpoczęciem betonowania i nie była wyłączona aż do zakończenia procesu chłodzenia. Okres ten nigdy nie trwa dłużej niż 7 dni.

W przypadkach, gdy konstrukcja ma swobodę odkształceń (konstrukcje statycznie wyznaczalne) można dopuścić w konstrukcji nawet stosunkowo wysokie przyrosty temperatur pod warunkiem, że w całej konstrukcji temperatury będą wyrównane. W tym przypadku, można zastosować pielęgnację poprzez nałożenie na powierzchni bloku izolacji utrudniającej odprowadzanie ciepła, a jednocześnie utrudniającej odprowadzanie wilgoci. Izolację taką można jednak usunąć dopiero wtedy, gdy różnica temperatury brzegu

konstrukcji i temperatury zewnętrznej nie będzie przekraczać 10 °C. Pamiętać należy, że przedwczesne usunięcie izolacji termicznej może wprowadzić w konstrukcji większe naprężenia, niż gdyby w ogóle nie stosowano izolacji.

4. KOMPLEKSOWE PODEJŚCIE DO BUDOWY KONSTRUKCJI

Przed rozpoczęciem budowy konstrukcji masywnej niezbędne jest opracowanie projektu technologicznego budowy. Projekt taki powinien być poprzedzony wykonaniem obliczeń wykazujących, że zapewnia on monolityczność konstrukcji na każdym etapie dojrzewania. Projekt powinien być kompleksowy, tzn. obejmować dobór wszystkich ww. czynników decydujących o zachowaniu monolityczności, a także sposób jej weryfikacji. Oznacza to, że na wykonanie kompleksowego projektu technologicznego składają się 4 aspekty:

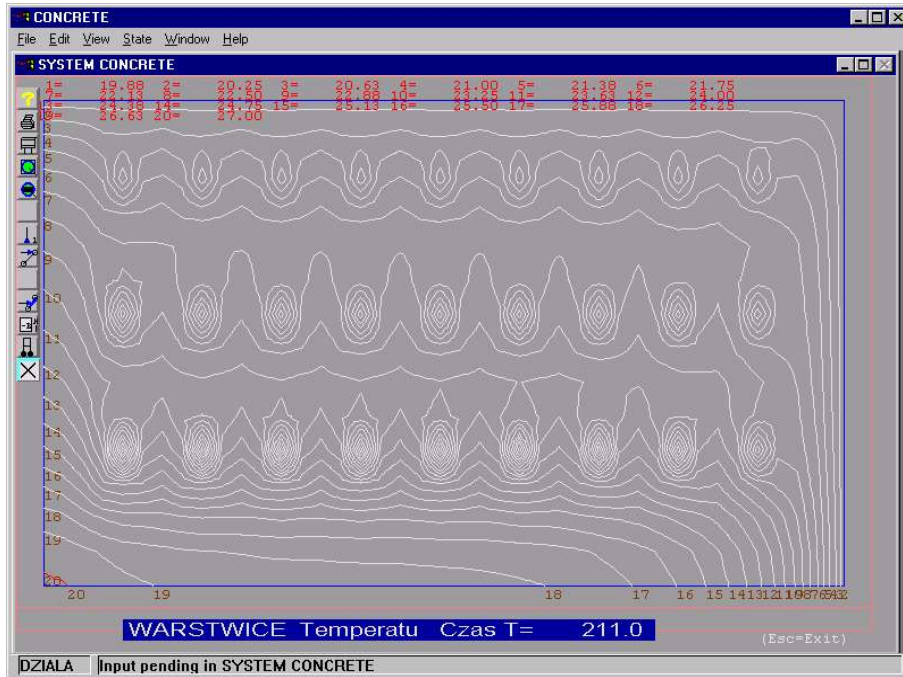
- symulacja komputerowa,
- technologia betonowania,
- sposób pielęgnacji i
- monitoring konstrukcji.

5. SYMULACJA KOMPUTEROWA

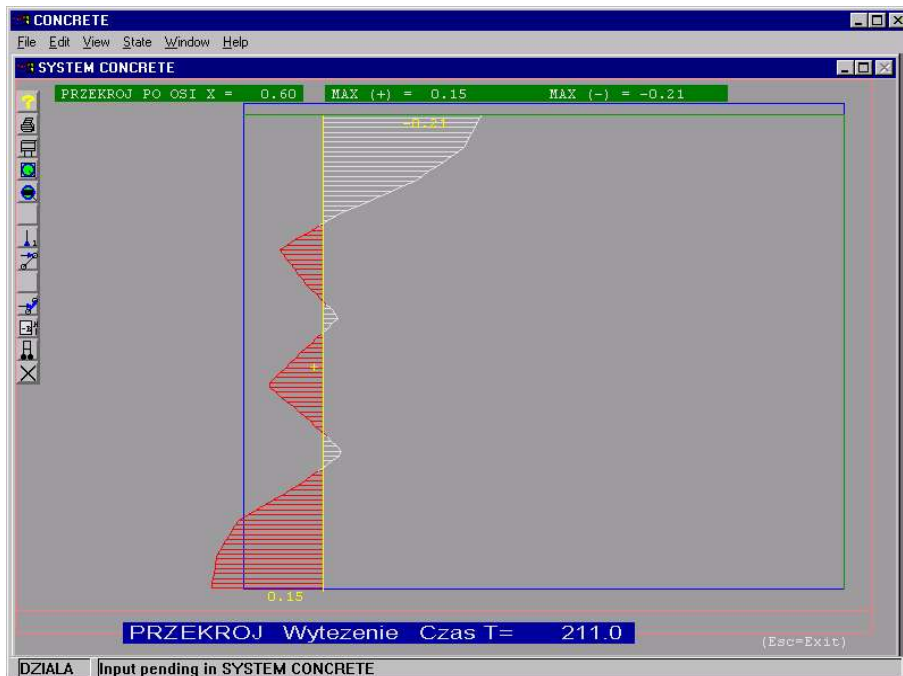
Symulacja komputerowa powinna umożliwiać ustalenie relacji między dwoma grupami zmiennych - *danymi wejściowymi* i *wynikami obliczeń*. Do grupy danych wejściowych należą wszystkie te wielkości, które w procesie przygotowań, budowy i pielęgnacji można zmieniać lub wybierać - wielkości, na które wykonawcy mają bezpośredni wpływ. Są to np. rodzaj cementu, jego zawartość w betonie, temperatura początkowa mieszanki lub brzegowe warunki termiczne. Poszukiwanymi wynikami obliczeń są m.in. temperatura, przemieszczenia, odkształcenia, naprężenia, wytrzymałość i wyężenia (przez wyężenie rozumie się tu aktualny stosunek naprężenia do wytrzymałości). Podkreślić trzeba, że wytrzymałość (i sztywność) nie jest tu wielkością daną, lecz poszukiwaną i zależy od składu mieszanki, czasu i historii temperatury. Wytrzymałość zmienia się wraz z czasem i położeniem analizowanego punktu.

Program przeznaczony do symulacji musi uwzględniać zależności między obu grupami zmiennych. W szczególności związki geometryczne, równania ruchu, równanie przewodnictwa, równania konstytutywne i kryterium zniszczenia. Jeśli w wyniku obliczeń symulacyjnych stwierdzimy, że przy przyjętych danych wejściowych w całej analizowanej konstrukcji nigdy nie zostanie spełnione kryterium zniszczenia (wyężenie jest zawsze mniejsze od 1), oznacza to, że z punktu widzenia monolityczności układ danych wejściowych może być zaakceptowany. Nie jest to jednak jedyny warunek akceptowalności danych wejściowych. Muszą one bowiem spełniać również szereg innych warunków wynikających z norm i przepisów, możliwości technicznych wykonawców i wymogów dopuszczalności i efektywności ekonomicznej. Jak stąd wynika, przeprowadzenie badań symulacyjnych i ustalenie wszystkich parametrów i czynności technologicznych nie daje się do końca zalgorytmizować i mimo wielkich postępów w informatyce i technikach obliczeniowych pozostaje nadal swego rodzaju sztuką, w której wiedza i doświadczenie odgrywają decydującą rolę.

Dla potrzeb badań symulacyjnych autor od szeregu lat rozwija system obliczeniowy o nazwie CONCRETE, który z powodzeniem jest stosowany w praktyce. Jest to system metody elementów skończonych, którego początki wywodzą się z systemu FEAP. Podstawę teoretyczną dla systemu CONCRETE w zakresie specyficznym dla analizy konstrukcji masywnych stanowi teoria dojrzewania prostego [2].



Rys. 3. System CONCRETE. Rozkład temperatury w bloku z chodzeniem rurowym



Rys. 4. System CONCRETE. Wyteżenie w przekroju bloku z chłodzeniem rurowym

6. TECHNOLOGIA BETONOWANIA

Na technologię betonowania składa się technologia produkcji mieszanki, transportu i układania betonu. Sprawy wyboru składników mieszanki i ustalenia receptury zostały już powyżej dostatecznie przedstawione, toteż obecnie skupimy się na innych aspektach.

Zasadnicze znaczenie ma przygotowanie mieszanki w sposób zapewniający jej możliwie niską temperaturę. Znanych jest tu szereg rozwiązań technologicznych. Z reguły polegają one na chłodzeniu składników przed wymieszaniem lub też zastąpieniu wody zarobowej lodem. Stosowane w ostatnich latach chłodzenie ciekłym azotem w Polsce nie wyszło poza sferę eksperymentów. Podkreślić jednak trzeba, że w Polsce nie ma żadnego węzła betoniarskiego przystosowanego do obniżania temperatury mieszanki, a posiadane doświadczenia nie skłaniają personelu do obniżania, lecz przeciwnie do podwyższania temperatury mieszanki.

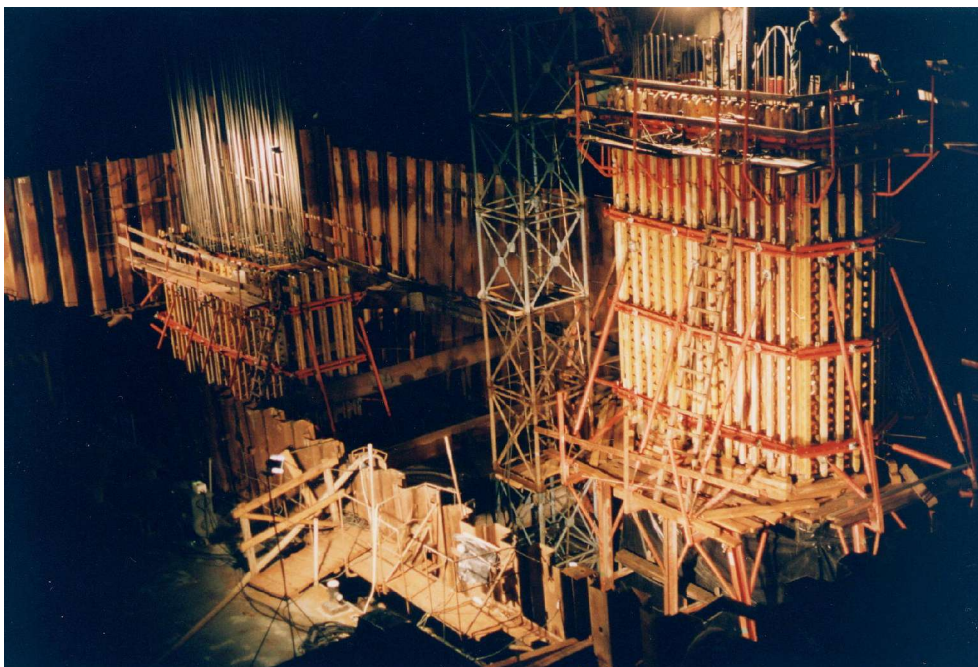
W obecnej sytuacji podstawowym wymogiem jest likwidacja ewidentnych błędów technologicznych, w wyniku których mieszanka ma nadmiernie wysoką temperaturę. Podstawowym warunkiem jest nie dopuszczenie do stosowania gorącego cementu. Betoniarze zwykle uważają, że im świeższy jest cement, tym lepszy. Toteż nagminnie jest stosowanie cementu dopiero co dostarczonego z cementowni. Cement taki często ma temperaturę dochodzącą do 80 °C, co powoduje gwałtowną hydratację i bardzo szybkie wydzielanie ciepła ze wszystkimi negatywnymi skutkami. Niezbędna jest kontrola temperatury wszystkich składników na węźle oraz kontrola temperatury na węźle i na budowie.

Drugim podstawowym błędem jest doprowadzenie do wzrostu temperatury mieszanki w czasie transportu lub jej układania. Dzieje się tak w okresie letnim gdy wydłuża się nadmiernie czas transportu (np. na skutek utrudnień w ruchu drogowym) lub gdy układanie mieszanki odbywa się w warunkach intensywnego promieniowania słonecznego. Latem należy unikać betonowania konstrukcji masywnych, a jeśli betonowanie takie jest konieczne należy je prowadzić po zachodzie słońca.

Samo układanie betonu powinno być ograniczone do bloków o wielkości i kształcie ustalonych drogą symulacji komputerowej przy założonych warunkach chłodzenia i pielęgnacji. W przypadku stosowania chłodzenia rurowego instalacja chłodząca musi zostać uruchomiona przed ułożeniem betonu.

7. SPOSÓB PIELĘGNACJI

Sposób pielęgnacji powinien być częścią projektu technologicznego. W odróżnieniu od pielęgnacji klasycznej pielęgnacja konstrukcji masywnych ma na celu nie tylko utrzymanie powierzchni konstrukcji w stanie wilgotnym, lecz przede wszystkim utrzymanie przewidzianego projektem reżimu termicznego. Najczęściej sprowadza się to do odbierania ciepła płynącego z wnętrza bloku tak, aby nie dopuścić do przekroczenia dopuszczalnego przyrostu temperatury. Najskuteczniejszym sposobem jest tu wprowadzenie ruchu wody chłodzącej. W wewnętrznej instalacji chłodzącej ruch wody jest sprawą oczywistą. Trzeba jednak pamiętać, że również woda wykorzystana do chłodzenia powierzchniowego musi być stale wymieniana. Konieczne jest więc zbudowanie całej instalacji doprowadzającej wodę do chłodzonej powierzchni, rozprowadzającej ją po tej powierzchni, a następnie odprowadzającej zużytą, tj. nagrzaną wodę. Instalacja chłodząca powinna być tak zaprojektowana, aby różnica między temperaturą wody napływającej i odprowadzanej nie przekraczała 2 °C. Instalację chłodzącą można wyłączyć, gdy przyrost temperatury wewnątrz bloku spadnie poniżej połowy maksymalnego przyrostu.



Rys. 5. Nocne betonowanie kolejnego bloku podpory mostowej



Rys. 6. Instalacja chłodząca na fundamencie pylonu Mostu Świętokrzyskiego

8. MONITORING KONSTRUKCJI

Jednym z najważniejszych elementów projektu technologicznego powinien być projekt monitoringu konstrukcji. Monitoring ten powinien zapewnić dowód, że konstrukcja zachowała monolityczność, tj. że nigdzie nie zostały przekroczone naprężenia dopuszczalne. Nie ma praktycznie sposobu bezpośredniego pomiaru wewnętrznych naprężeń w konstrukcji, jednakże dla uzyskania takiego dowodu wystarczy monitorować temperaturę konstrukcji. Przy ustalonych warunkach podparcia i ustalonym materiale pole temperatury jednoznacznie pozwala ustalić stan naprężenia. Porównując zmierzone temperatury z temperaturami ustalonymi podczas symulacji komputerowej można jednoznacznie wnioskować o zachowaniu monolityczności konstrukcji.

Podczas betonowania monitorowaniu powinny podlegać temperatura i opad mieszanki. Pomiary należy wykonywać na węzle i na budowie dla każdej gruszki indywidualnie, a wyniki pomiarów protokołować. Ponadto, jeśli istnieje wewnętrzna instalacja chłodząca, należy co godzinę dokonywać pomiarów temperatury na wlocie i wylocie każdego niezależnego obiegu.

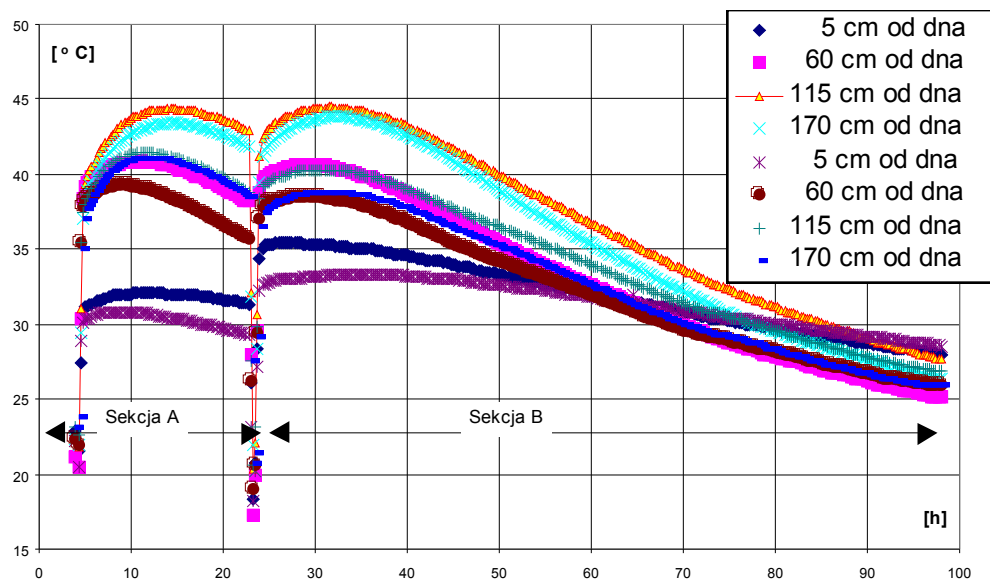
Po zakończeniu betonowania należy tak szybko jak to możliwe uruchomić instalację chłodzenia powierzchniowego. Trzeba podkreślić, że powszechnie używana nazwa instalacja chłodząca jest myląca i nie oddaje zasadniczego celu. Tym zasadniczym celem nie jest bowiem ochłodzenie konstrukcji, lecz nie dopuszczenie do jej nagrzania. Dlatego jest tak ważne, aby chłodzenie powierzchniowe zostało uruchomione jak najszybciej. Wskazane jest wykonanie lokalnych zabezpieczeń przed wymywaniem świeżego betonu przez strumienie napływającej wody i uruchomienie chłodzenia jeszcze przed zakończeniem wiązania.

Jednym z kardynalnych błędów jest uruchomienie chłodzenia dopiero po nagraniu konstrukcji. Wprowadzenie czynnika chłodzącego na rozgrzaną konstrukcję prowadzi do szoku termicznego i może skończyć się jej spękaniem.



W trakcie prowadzenia pielęgnacji należy prowadzić monitorowanie konstrukcji przez pomiar temperatury we wnętrzu dojrzewającego bloku na głębokości odpowiadającej maksymalnej temperaturze oraz przy powierzchni w kilka charakterystycznych punktach pomiarowych pozwalających na ustalenie pola powierzchni w całym dojrzewającym bloku. Ponadto należy mierzyć temperaturę wody chłodzącej w miejscu jej napływu i przy każdej studni odbierającej zużyłą wodę. Oprócz tego należy prowadzić pomiary powietrza. Odczyty we wszystkich punktach pomiarowych powinny być wykonywane co godzinę i protokołowane. Monitorowanie można przerwać w tym samym czasie, gdy kończy się pielęgnację termiczną.

Rys. 7. Sonda pomiarowa skonstruowana pod kierunkiem autora. Sondy takie umożliwiają zdalne monitorowanie konstrukcji masywnych. Transmisja wyników odbywa się drogą radiową z wykorzystaniem sieci GSM.



Rys. 8. Rozwój temperatury w dwóch sekcjach bloku B2 fundamentu pylonu Mostu Świętokrzyskiego. Beton B30; cement CEM I 42,5 Rejowiec; dozowanie 370 kg/m³; wysokość betonowania 250 cm; temperatura mieszanki 25 °C.

9. ZAKOŃCZENIE

Technologia konstrukcji masywnych z betonu wymaga stosowania zupełnie odmiennych zasad niż znane z praktyki budowlanej przy wznoszeniu klasycznych konstrukcji betonowych. Przykładem może tu być fakt, że powiększenie przekroju konstrukcji prowadzi tu do wzrostu, a nie spadku naprężeń. Zastosowanie mocniejszego cementu, czy zwiększenie dozowania nie poprawia, lecz pogarsza stan naprężenia. Wymagania, jakie stawia się tu przed technologią wykonywania, są znacznie trudniejsze do spełnienia, a kolejną trudność sprawia to, że brak jest jak dotąd w tej dziedzinie unormowań. Dotyczy to w szczególności kontroli jakości wykonania. Przestrzeganie obowiązujących wymagań normowych dostosowane jest do kontroli własności materiału i nie ma nic wspólnego z kontrolą monolityczności konstrukcji. Można więc spełnić wszystkie wymagania normowe, a jednocześnie doprowadzić do sytuacji, gdy konstrukcja przypominać będzie różaniec - na pręty zbrojenia nanizane będą oddzielne fragmenty betonu. Dla zapobieżenia tej sytuacji wskazane jest możliwie szybkie wprowadzenie do norm wymagań co do reżimu termicznego dojrzewającej konstrukcji i protokolarnego prowadzenia pomiarów temperatury na równi z protokolarnym badaniem wytrzymałości próbek.

1LITERATURA

Witakowski P. , *Analiza naprężeń termicznych w masywach betonowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1977

2 Witakowski P. , *Termodynamiczna teoria dojrzewania. Zastosowanie do konstrukcji masywnych z betonu*, Politechnika Krakowska, zeszyt naukowy nr 1, Kraków 1998