

# Internetowy system nadzoru dla budownictwa betonowego

*Do monitorowania przebiegu temperatury wewnątrz dojrzewającej konstrukcji betonowej został skonstruowany skomputeryzowany system pomiarowy SPT-GSM. Prototyp tego systemu powstał w roku 1998 i od tego czasu system ten był stosowany na kolejnych budowach, a uzyskiwane doświadczenia wykorzystywane do jego doskonalenia. System składa się z autonomicznych modułów pomiarowych oraz pakietu oprogramowania zainstalowanego w centrali systemu. Każdy z modułów pomiarowych wyposażony jest w sondę umieszczaną w betonie i zawierającą czujniki pomiarowe, które mogą być rozmieszczane na długości sondy zgodnie z potrzebami pomiarowymi. Wyniki mogą być przesyłane przez sieć GSM do centrali w dowolnym momencie i tym samym możliwy jest zdalny monitoring stanu termicznego obiektu.*

Zarobienie cementu wodą rozpoczyna proces hydratacji cementu, w wyniku którego mieszanka betonowa początkowo zwiększa swą lepkość, następnie zmienia stan skupienia, a potem już jako ciało stałe zwiększa swą sztywność i wytrzymałość. Ogół zjawisk związanych z tymi przemianami nazywa się procesem dojrzewania betonu. Procesowi dojrzewania betonu towarzyszy wydzielanie się ciepła hydratacji cementu. Prowadzi to do początkowo szybkiego wzrostu temperatury betonu, a następnie do stosunkowo wolnej fazy stygnięcia aż do zrównania temperatury betonu z temperaturą otoczenia. Te zmiany temperatury pomijane są do tej pory w uregulowaniach normowych [1]. Mają jednak często zasadnicze znaczenie dla trwałości konstrukcji, gdyż prowadzą do odkształceń i naprężeń termicznych, których wynikiem mogą być rysy i pęknięcia [2, 3]. W wielu przypadkach, np. w budownictwie hydrotechnicznym, mogą one całkowicie dyskwalifikować konstrukcje, a naprawa uszkodzeń może być bardzo trudna i kosztowna [4].

Wzrost temperatury przyspiesza proces dojrzewania i zjawisko to jest wykorzystywane w wielu metodach przyspieszonego dojrzewania – polegają one zwykle na intencjonalnym podniesieniu temperatury betonu. Zróżnicowanie temperatury wewnątrz dojrzewającej konstrukcji betonowej powoduje z jednej strony

niejednorodność pola odkształceń i groźbę uszkodzeń termicznych, z drugiej zaś strony powoduje różną szybkość dojrzewania w różnych punktach konstrukcji. Jeśli nawet zmiany temperatury nie prowadzą do uszkodzeń termicznych, to różnice temperatur w różnych punktach mogą prowadzić do błędnej oceny aktualnej wytrzymałości i awarii konstrukcji w wyniku przedwczesnego obciążenia. Podkreślić też trzeba, że wszystkie przewidziane w normach badania przeprowadza się na oddzielnie wykonanych próbkach sześciennych lub walcowych [5, 6], czyli o zupełnie innych wymiarach niż rzeczywista konstrukcja i tym samym, nawet przy ich przechowywaniu w pobliżu konstrukcji, przechodzących inny proces termiczny. Wyniki badania wytrzymałości na takich próbkach mają więc tylko ograniczoną wiarygodność dla oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji, zwłaszcza że różne jej punkty przechodzą różny proces termiczny.

Mimo rozpoznania jeszcze w latach 70. zasadniczych efektów termicznych i mechanicznych związanych z wydzielaniem ciepła w dojrzewającym betonie i licznych fragmentarycznych prób opisu teoretycznego (obszerną bibliografię wczesnych prac z tej tematyki zawiera [7]) brak było spójnego opisu całego zjawiska, co powodowało wiele wątpliwości i sporów co do poszczególnych zaleceń technologicznych. W szczególności nie rozumiano zjawiska wewnętrznego klinowania struktury (i powstrzymywania odkształceń) [8] i w literaturze trwał spór co do tego, czy dla uniknięcia spękań należy konstrukcję chłodzić, czy izolować termicznie [7]. Echa tego sporu odzywiają się jeszcze obecnie i nierazkie są przypadki błędów w pielęgnacji konstrukcji maszynych.

Pierwszy kompleksowy opis zjawiska wraz z podstawami teoretycznymi stanowi utworzona w roku 1984 ogólna termodynamiczna teoria ośrodka dojrzewającego i jako szczególny jej przypadek teoria dojrzewania prostego (simple maturing theory) [9]. W roku 1985 teoria ta została opublikowana [10], a w roku 1986 zbudowany został prototyp systemu obliczeniowego CONCRETE przeznaczonego do analiz według teorii dojrzewania prostego. System ten stworzono przez rozszerzenie systemu FEAP, opracowanego przez zespół pod kierunkiem prof. Taylora na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley. FEAP stanowi pakiet oprogramowania metody elementów skończonych (MES) i przeznaczony jest do zadań czysto mechanicznych. CONCRETE zawiera moduły rozszerzające zakres zastosowań na zadania termomechaniczne liczące w oparciu o teorię dojrzewania prostego. Prace programowe związane z napisaniem systemu CONCRETE wykonał mgr inż. A. Pietrzyk z Politechniki Warszawskiej (obec-



Rys. 1. Ciąg przyczynowo-skutkowy decydujący o zachowaniu lub braku monolityczności konstrukcji

nie profesor na Uniwersytecie w Göteborgu). Pierwsze publikacje wraz z rozwiązaniami numerycznymi według tej teorii datują się na rok 1987 [11, 12]. Przez szereg następných lat trwały prace nad doskonaleniem procedur numerycznych i rozwojem systemu (prace te wykonywał mgr inż. Gryszkiewicz), a równocześnie tworzono instrumentarium doświadczalne dla pozyskiwania danych materiałowych niezbędnych do obliczeń według systemu CONCRETE. Kompleksowy opis teorii, programu, stworzonej bazy doświadczalnej, procedur stosowanych przy analizie, a także wiele wyników symulacji komputerowych zebrano w pracy [13]. W szczególności w pracy tej przedstawiono analizę parametryczną wpływu poszczególných czynników technologicznych dostępnych w praktyce budowlanej.

Podkreślić trzeba, że w teorii dojrzewania prostego miarą zaawansowania procesu dojrzewania, czyli wskaźnikiem dojrzałości, jest ciepło hydratacji  $Q(t)$ . Można wykazać, że znajomość procesu termicznego  $T(t)$  pozwala na wyznaczenie wskaźnika dojrzałości, a tym samym na wyznaczenie wszelkich własności materiałowych dojrzewającego ośrodka – w szczególności jego aktualnej wytrzymałości na ściskanie  $R_s(t)$ .

### 1. Analiza i projektowanie konstrukcji betonowych według teorii dojrzewania prostego

W ciągu ostatnich 20 lat pojawiło się wiele publikacji dotyczących analizy temperatur, odkształceń i naprężeń wywołanych ciepłem hydratacji w dojrzewającym betonie. Pomijając prace przyczynkowe wymienić tu trzeba pracę Emborga (1989) [14], szereg prac autorów francuskich, szwedzkich i japońskich przedstawionych na konferencji RILEM w 1994 roku [15], a z nowszych opracowań prace Kiernyżckiego [16] i Röhlinga [3]. W poszczególných publikacjach analizuje się zagadnienie w różnym zakresie. Porównując zakres tych prac z ciągiem przyczyn i skutków przedstawionym na rysunku 1 trzeba zauważyć, że wyniki analizy zależą od tego:

1<sup>o</sup> w jaki sposób na podstawie składu mieszanki i warunków termicznych ustala się pole temperatury

2<sup>o</sup> w jaki sposób na podstawie temperatury i warunków mechanicznych ustala się pole odkształceń

3<sup>o</sup> w jaki sposób na podstawie pola odkształceń ustala się pole naprężeń i wreszcie

4<sup>o</sup> w jaki sposób na podstawie pola naprężeń ustala się zachowanie lub utratę monolityczności – jakie przyjmuje się kryterium zarysowania.

Odpowiedź na te cztery pytania decyduje o dokładności opisu. Poszczególne opracowania teoretyczne reprezentują odmienną filozofię podejścia do problemu i w efekcie różnią się odpowiedzią na te pytania. Konsekwencją jest to, że wymagają innych danych materiałowych i innych eksperymentów dla ich uzyskania. W wyniku prac prowadzonych w IPPT i ITB doprowadzono do ustalenia oryginalnej polskiej metody analizy i projektowania konstrukcji według technologii konstrukcji masywnych. Ma ona dobrze ugruntowane podstawy naukowo-doświadczalne, dla których można wyróżnić cztery poziomy.

1) **Podstawy teoretyczne i eksperymentalne.** Podstawy teoretyczne stanowi teoria dojrzewania prostego. Dla analizy i symulacji komputerowej niezbędne jest doświadczalne określenie szybkości wydzielania się ciepła i dynamiki narastania wytrzymałości betonu. Dla ustalania tych danych zbudowane zostały skomputeryzowane systemy pomiarowe SSK i DNW

2) **Symulacja komputerowa.** Do jej prowadzenia wykorzystuje się opisany wyżej system CONCRETE

3) **Weryfikacja doświadczalna.** Przed ostatecznym zatwierdzeniem technologii wykonania dokonuje się laboratoryjnego potwierdzenia słuszności wszystkich założeń materiałowych – zbudowano do tego celu skomputeryzowany system DWL

4) **Kontrolne badania polowe.** Służą one do monitorowania prze-

biegu dojrzewania betonu na placu budowy i do uprzedzenia ewentualnych zagrożeń dla monolityczności konstrukcji – do tego celu zbudowano opisane dalej systemy SPT-GSM-GPS i SPD.

#### 1.1. Ustalanie pola temperatury

Zachowanie zgodności między opisem teoretycznym a bazą doświadczalną jest często najniższym punktem teorii. Istnieje naturalna skłonność do tego, że przyjmuje się dane materiałowe dostępne w literaturze nie bacząc na procedurę eksperymentu, który doprowadził do ich uzyskania. Dla metody symulacji i projektowania masywnych konstrukcji betonowych kluczowe znaczenie ma w tym względzie sposób ustalania pola temperatury. Wymaga to rozwiązania równania przewodnictwa cieplnego Fouriera-Kirchhoffa, co z kolei wymaga określenia funkcji źródeł  $W(t, T)$  – gęstości mocy ciepła hydratacji - która w istotny sposób zależy od czasu i temperatury. Budowa równania przewodnictwa cieplnego wymaga, aby funkcja ta pochodziła z badania izotermicznego i w danej chwili odpowiadała aktualnej temperaturze betonu. Nie dbając o to wiele istniejących metod obliczania z braku właściwej bazy doświadczalnej przyjmuje tu funkcję źródeł z badań adiabatycznych lub semiadiabatycznych. Zanedbuje się tu zależność funkcji źródeł od temperatury. Szereg innych metod posługuje się wynikami z takich eksperymentów, lecz dodatkowo wstawia zależność od temperatury odpowiadającą badaniu izotermicznemu. Zależność taka z reguły przyjmuje postać tzw. funkcji temperatury  $f(T)$  wprowadzonej przez E. Rastrupa [17]. Stanowi to jednak błąd logiczny i dowód niezrozumienia znaczenia funkcji źródeł w równaniu przewodnictwa.

Odrębną sprawą stanowi postać funkcji źródeł, którą coraz częściej przyjmuje się w postaci

$$f(T) = k \cdot \exp \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{T_k} \right) \right]$$

gdzie:

$k$  – współczynnik proporcjonalności

$E$  – energia aktywacji [kJ/mol]

$R$  – uniwersalna stała gazowa;  $R=8,314$  J/(mol K)

$T_k$  – temperatura absolutna [°K].

Propozycję takiej funkcji pierwszy sformułował (1971) L. Stoch [18], a w roku 1977 powtórzyli ją Freisleben-Hansen i Pedersen [19] i inni, np. [20]. Byfors i Jonasson stwierdzają [21, 22], że dla dobrej zgodności z eksperymentem stałe  $k$  i  $E$  muszą być uzależnione nie tylko od rodzaju cementu, lecz również i od temperatury. Jest to najlepszym dowodem na to, że wykorzystywanie prawa Arrheniusa do budowy funkcji temperatury sprowadza się jedynie do wykorzystania w tym charakterze funkcji o określonej postaci matematycznej i nie ma żadnego uzasadnienia fizycznego – zaczyn cementowy nie jest gazem i nie można współczynnikiem  $k$  i  $E$  przypisywać takiego znaczenia jak w przemianach gazowych, do opisu których powstało prawo Arrheniusa.

Wszystkie ww. wymienione założenia co do wpływu temperatury na szybkość hydratacji i związane z nimi niespójności w ustalonej przez autora metodzie opartej o teorię dojrzewania prostego w ogóle nie występują. Zarówno wartości samej funkcji źródeł  $W(T, t)$ , jak też wpływ temperatury na tę funkcję pozyskuje się z badań kalorymetrycznych dzięki specjalnie skonstruowanemu skomputeryzowanemu systemowi kalorymetrycznemu SSK [23]. Badanie kalorymetryczne prowadzone za pomocą systemu SSK jest dostosowane do potrzeb wynikających z teorii dojrzewania prostego, a algorytm obliczeniowy przyjęty w systemie CONCRETE jest dostosowany do postaci wyników, jakie uzyskuje się z systemu SSK.

System SSK pozwala na wyznaczenie funkcji źródeł w warunkach izotermicznych dla różnych temperatur. Badaniu poddaje się tu zaczyn w obecności wszystkich domieszek, jakie mają być zastosowane w betonie, co pozwala na uwzględnienie ich wpływu. Badania wykonuje się z pewnym krokiem temperaturowym (zazwyczaj co 5°C) i uzupełnia się przez zastosowanie interpolacji względem temperatury i czasu. Pozwala to na określenie funkcji źródeł  $WT(T,t)$  dla dowolnej chwili i dla dowolnej temperatury. Ustalenie funkcji  $WT(T,t)$  pełni rolę „kalibracji termicznej” materiału. Przykładowy wynik takiego badania przedstawia rys. 2.

Wyznaczanie pola temperatury w systemie CONCRETE odbywa się na każdym kroku czasowym równocześnie z wyznaczaniem wartości funkcji źródeł w każdym punkcie analizowanego obszaru.

## 1.2. Ustalanie pól wielkości mechanicznych

Pola wielkości mechanicznych – przemieszczeń, odkształceń i naprężeń – są wyznaczane drogą symulacji komputerowej za pomocą systemu CONCRETE. Obliczenia prowadzi się „krok po kroku” odwzorowując cały proces dojrzewania betonu. Na każdym kroku czasowym aktualizuje się w każdym punkcie właściwości materiałowe betonu. Podstawą analizy jest układ równań konstytutywnych podobny do równań Duhamela-Neumanna

$$\sigma = 2\mu(Q)\varepsilon_{ij} + (\lambda(Q)\varepsilon_{kk} - \gamma(Q)\Theta)\delta_{ij}$$

gdzie  $\mu$  i  $\lambda$  są odpowiednikami stałych Lamego, a  $\gamma$  stanowi tzw. współczynnik naprężalności termicznej. Wszystkie współczynniki materiałowe występujące w tych równaniach są funkcjami dojrzalności. Wielkości mechaniczne wyznacza się więc po wyznaczeniu rozwoju dojrzalności. Dla „skalibrowanego termicznie” materiału sprowadza się to do ustalenia historii temperatury  $T(t)$ .

Oprócz „kalibracji termicznej” niezbędne jest przeprowadzenie „kalibracji mechanicznej” materiału, czyli ustalenie zależności własności mechanicznych od dojrzalności. Dla określania tych zależności skonstruowany został skomputeryzowany system do badania dynamiki narastania wytrzymałości DNW [24]. Badanie za pomocą tego systemu odbywa się w pełni automatycznie. Stanowi on rodzaj robota wykonującego kompletne badania wytrzymałościowe zgodnie z zaprojektowanym wcześniej harmonogramem. Jako wynik badania jednej próbki uzyskuje się pełną charakterystykę materiału  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  wraz z częścią pokrytyczną (softening). Wytrzymałość próbki jako maksimum naprężenia uzyskane w danej próbie stanowi wytrzymałość materiału dla danego wieku. Aktualne wartości modułu sprężystości  $E(t)$  i współczynnika Poissona  $\nu(t)$  (lub stałych Lamego) mogą być ustalone na podstawie wytrzymałości na ściskanie  $R(t)$ . Z założeń teorii dojrzewania prostego wynika, że wystarczy znajomość tej zależności dla jednej dowolnej, ale stałej tem-

peratury  $T = \text{const} - R_r(t)$ . Znajomość tej zależności wraz z wynikami „kalibracji termicznej” pozwala na ustalenie zależności wytrzymałości od wskaźnika dojrzalności  $R(Q)$ .

## 1.3. Ustalenie kryterium zniszczenia

Dla teorii dojrzewania prostego nie jest ważne, jakiego rodzaju kryterium zniszczenia zostanie przyjęte. Ponieważ jednak największe zagrożenie dla monolityczności konstrukcji pojawia się ze strony naprężeń rozciągających w strefach, gdzie panuje płaski stan naprężenia lub stan do niego zbliżony, w praktyce przyjmuje się jako kryterium zniszczenia kryterium największego naprężenia rozciągającego. Jest ono najbardziej udokumentowane doświadczalnie. Pierwsze wyniki dla płaskiego stanu naprężenia pochodzą jeszcze z badań Kupfera, Hilsdorfa i Rüscha, jakie wykonali w roku 1969 [25]. Od tego czasu wykonano szereg innych badań w dwu- i trójosiowym stanie naprężenia, potwierdzających te wyniki. Pozwala to na przyjęcie kryterium zniszczenia dla betonu w dwuosowym stanie rozciągania w postaci  $\max(\sigma_1(t), \sigma_2(t)) = R_r(t)$ , gdzie  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  oznaczają naprężenia główne. Na podstawie przeprowadzonej analizy optymalizacyjnej stwierdzono [13], że dla polskich betonów zależność między aktualną wytrzymałością na ściskanie  $R_s$  a aktualną wytrzymałością na rozciąganie  $R_r$  może być przedstawiona zależnością potęgową

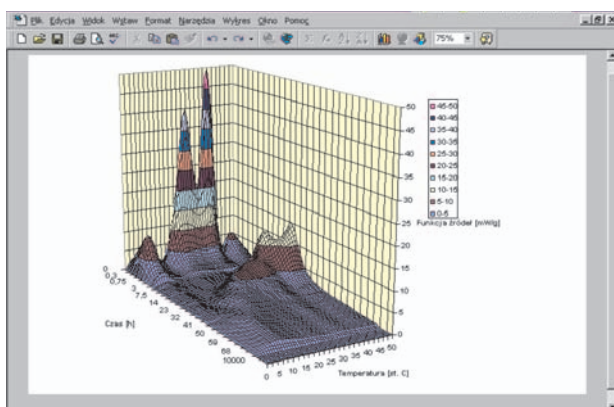
$$R_r = 0,3981(R_s)^{0,6} \text{ [MPa]}.$$

## 1.4. Weryfikacja doświadczalna analizy i projektu

Wykonanie projektu technologicznego konstrukcji zgodnie z technologią konstrukcji masywnych wymaga jednoczesnego zaprojektowania technologii budowy i receptury mieszanki betonowej, tak aby spełnić wszystkie wymagania projektowe, a jednocześnie nie dopuścić w czasie dojrzewania do przekroczenia naprężeń dopuszczalnych. Wykonanie projektu technologicznego sprowadza się do postawienia założeń co do składu recepturowego mieszanki, warunków betonowania, podziału na etapy betonowania itp., a następnie na przeprowadzeniu symulacji systemem CONCRETE i zbadaniu, czy konstrukcja w czasie dojrzewania zachowa monolityczność. Jeśli drogą symulacji uzyskamy rozwiązanie spełniające wszystkie wymagania, należy dokonać weryfikacji doświadczalnej przyjętych założeń materiałowych. Do tego celu został w ITB skonstruowany system doświadczalnej weryfikacji laboratoryjnej DWL. Pozwala on na zweryfikowanie ogółu przyjętych założeń przez porównanie wyników pomiaru z wynikami symulacji w warunkach jednoosowego przepływu ciepła (rys. 3).

## 1.5. Nowe możliwości

Przedstawione powyżej podstawy teoretyczne i doświadczalne składają się na spójną metodę analizy i projektowania konstrukcji betonowych według technologii konstrukcji masywnych – ist-



Rys. 2. Przykładowy wynik badania funkcji źródeł za pomocą systemu SSK



System DWL podczas badania

nieje pełna zgodność metod eksperymentalnych i obliczeniowych z podstawami teoretycznymi.

Przedstawione podstawy teoretyczne i doświadczalne wskazują ponadto na praktyczną możliwość zdalnego pomiaru wytrzymałości w dojrzewającej konstrukcji. Jak bowiem wykazano, w ramach teorii dojrzewania prostego niezbędna i wystarczająca do ustalenia wytrzymałości jest znajomość trzech następujących cech:

- 1) rodziny izotermicznych funkcji źródeł  $WT(T, t)$ ,  $T \in (0, 100)$ ,  $t \in [0, \infty)$
- 2) zależności wytrzymałości od wskaźnika dojrzałości  $R_s(Q)$  oraz
- 3) historii temperatury w badanym punkcie materiału – procesu termicznego  $T(\tau)$ ,  $\tau \in [0, t]$ .

Jak z tego widać, dysponując wynikami kalibracji termicznej materiału można ustalić wskaźnik dojrzałości na podstawie historii temperatury, a dysponując wynikami kalibracji mechanicznej można ustalić wytrzymałość. Otwiera to nowe możliwości dla nadzoru i monitorowania rozwoju wytrzymałości wewnątrz konstrukcji.

## 2. Kontrolne badania polowe i system SPT-GSM-GPS

Prawidłowe zaprojektowanie samej mieszanki i technologii wykonywania elementu nie zapewnia jeszcze poprawności jego wykonania. Niezbędna jest w tym celu obserwacja przebiegu dojrzewania betonu i korekta w przypadku odstępstwa któregoś z parametrów w stosunku do założeń przyjętych podczas projektowania. Celem prowadzonych obserwacji jest zachowanie monolityczności wykonywanego obiektu. Patrząc na ciąg przy czynowo-skutkowy zilustrowany na rys. 1 można stwierdzić, że obserwacje prowadzone w tym celu mogą dotyczyć temperatury, odkształceń lub naprężeń. Ze względu na łatwość pomiaru prawie zawsze obserwacje prowadzi się w odniesieniu do temperatury. Prawidłowość procesu dojrzewania ocenia się poprzez porównanie wartości zmierzonych z wartościami uzyskanymi podczas symulacji komputerowej w ramach projektowania.

Do monitorowania przebiegu temperatury wewnątrz dojrzewającej konstrukcji został pod kierunkiem autora skonstruowany skomputeryzowany system pomiarowy SPT-GSM [26]. Prototyp tego systemu powstał w roku 1998 i od tego czasu system ten był stosowany na kolejnych budowach, a uzyskiwane doświadczenia wykorzystywane do jego doskonalenia. System składa się z autonomicznych modułów pomiarowych oraz pakietu oprogramowania zainstalowanego w centrali systemu, tj. w komputerze w ITB. Każdy z modułów pomiarowych wyposażony jest w sondę umieszczaną w betonie i zawierającą czujniki pomiarowe, które mogą być rozmieszczane na długości sondy zgodnie z potrzebami pomiarowymi. Wyniki mogą być przesyłane przez sieć GSM do centrali w dowolnym momencie i tym samym możliwy jest zdalny monitoring stanu termicz-

nego obiektu. Możliwa jest zarówno praca w trybie *on line*, kiedy obserwuje się na bieżąco zmiany temperatury, jak też w trybie *off line*, kiedy wyniki przesyłane są do centrali okresowo w postaci tzw. autoraportu. System SPT-GSM odegrał ważną rolę przy nadzorze nad budową kilku ważnych obiektów, a m.in. mostu Siekierkowskiego, gdyż pozwolił na natychmiastową korektę zauważonych błędów pielęgnacyjnych. Poczynając od roku 2002 każdy moduł systemu był wyposażony w odbiornik satelitarny GPS. Powstał w ten sposób stosowany do dziś system SPT-GSM-GPS. Każdy moduł tego systemu odczytuje i raportuje do centrali swoje położenie, co zapobiega niebezpieczeństwu błędnej lokalizacji wyników pomiarowych. Obecnie jest stosowany na innych obiektach.

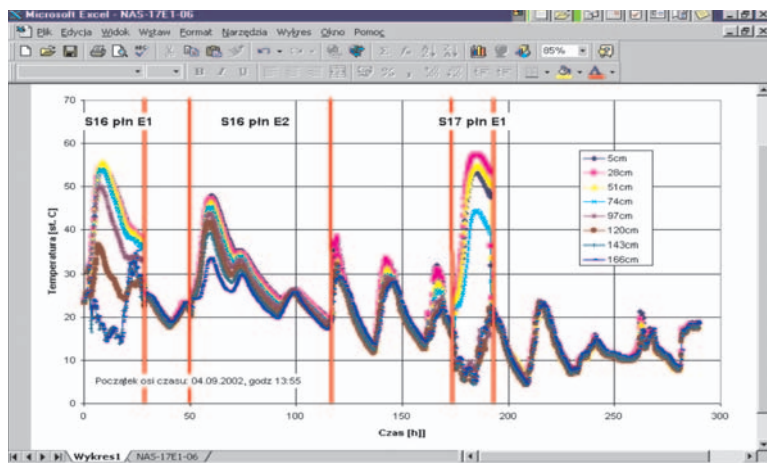
## 3. Komputerowy system zdalnego pomiaru dojrzałości – SPD

Uwagi przedstawione w rozdziale 1. wskazują na potrzebę opracowania metody badania wytrzymałości betonu wewnątrz konstrukcji. Bardzo ważne jest też, aby pomiar wytrzymałości mógł się odbywać w sposób zdalny i pozwalał na obserwację dynamiki narastania wytrzymałości w wybranych punktach konstrukcji w sposób ciągły. Jest to niezbędne dla ustalenia właściwego momentu dla przyłożenia ustalonego obciążenia do konstrukcji lub wybrania wielkości dopuszczalnego obciążenia dla ustalonego czasu. Potrzeby te spełnia opracowana przez autora metoda i wykonana aparatura.

Jak już wyżej zaznaczono, metoda dojrzewania prostego daje teoretyczną podstawę do ustalania wytrzymałości dojrzewającego betonu na podstawie pomiaru wskaźnika dojrzałości – wskaźnikiem tym jest aktualne ciepło hydratacji  $Q(t)$ . Dla ustalenia wytrzymałości „skalibrowanego” betonu niezbędna jest tylko znajomość historii temperatury. Podkreślić trzeba, że dla ustalenia wytrzymałości nie wystarczy znajomość temperatury aktualnej – potrzebna jest znajomość całej historii temperatury, poczynając od chwili zarobienia cementu wodą, aż do chwili aktualnej  $T(\tau)$ ,  $\tau \in [0, t]$ . Dopiero historia temperatury pozwala na wyznaczenie wskaźnika dojrzałości  $Q(t)$ .

Istotą zdalnego pomiaru wytrzymałości jest to, że pomiary temperatury wykonuje się w miejscu wbudowania betonu, natomiast informacje o wytrzymałości są *on line* dostępne w odległym miejscu – w centrali, gdzie wykonuje się obliczenia i analizy. Niezbędne pomiary temperatury i teletransmisję danych pomiarowych z placu budowy do centrali zapewnia system SPT-GSM.

W wyniku wcześniejszej kalibracji materiału i działania systemu SPT-GSM w centrali obliczeniowej pojawia się komplet informacji o funkcjach  $W_r(T, t)$ ,  $R_r(t)$  i  $T(\tau)$ ,  $\tau \in [0, t]$ . Umożliwia to przetworzenie uzyskanych wyników pomiarowych i obliczenie aktualnej wytrzymałości betonu  $R(t)$ . Do tego celu zbudowany został komputerowy system obliczeniowy SPD (system pomiaru



Rys. 3. Wyniki uzyskane drogą radiową dla kolejnych segmentów estakady węzła Czerniakowska



Sonda systemu SPT-GSM-GPS podczas monitorowania płyty stropowej tunelu Wisłostrody

Źródło: Archiwum

dojrzałości) zwany również niekiedy „maturometrem” (rys. 4). System został przystosowany do pracy interaktywnej, przy której operator wybiera z podsuwanego przez system menu kolejno: **cement, spoiwo, beton, budowę i dane SPT**. W wyniku kolejnych wyborów na ekranie pojawi się wykres przedstawiający rozwój wytrzymałości w punktach rozmieszczenia czujników dla wybranego okresu i wartości odpowiadające końcowi okresu analizy. Jeśli zachodzi potrzeba udokumentowania uzyskanych wyników, możemy wybrać opcję **Raport**. W wyniku tego utworzony zostanie dokument, który może być wydrukowany i zarchiwizowany (rys. 5).

#### 4. Internetowy system nadzoru dla budownictwa betonowego

Powyższe rozważania prowadzą do wniosku, że istnieje potrzeba i możliwość stworzenia kompleksowego systemu nadzoru dla budownictwa betonowego, który łączyłby w sobie trzy zasadnicze cechy – wykonanie obserwacji, jej analizę i ocenę oraz przekazanie dyspozycji wynikającej z oceny. Przez obserwację rozumiemy tu jakiegokolwiek działanie, które przynosi skwantyfikowaną wartość obserwowanego parametru. Najczęściej będzie to klasyczny pomiar takich wielkości jak temperatura, przemieszczenie, odkształcenie czy czas. Z reguły wykonanie obserwacji wymaga przyrządów pomiarowych, a jeśli obserwacja ma być wykonana *in situ* (na budowie), konieczne jest wyposażenie w niezbędne narzędzia do tego celu służące. Jak pokazuje przykład systemu SPT-GSM-GPS, technika pomiarowa została prawie całkowicie z informatyzowana, a współczesne przyrządy pomiarowe mogą wykonywać wszystkie swe funkcje *in situ*, często bez udziału operatora.

Ocena zaobserwowanej wielkości może niekiedy wymagać bardzo zaawansowanej analizy komputerowej. Przykładem może tu być przedstawiony system SPD. Niezbędne są tu zaawansowane narzędzia w postaci sprzętu komputerowego i programów obliczeniowych, ale również konieczne jest korzystanie z danych pochodzących z innych systemów pomiarowych i zawartych w bazie danych. Analiza taka musi być prowadzona w laboratorium lub w ośrodku obliczeniowym. Taki tryb pracy będziemy określać mianem *in centrali*. Warunkiem prowadzenia takiej

analizy jest transmisja wyników z placu budowy do centrali. Trzeci element kompleksowego systemu nadzoru, czyli przekazanie dyspozycji wynikającej z oceny, jest immanentnie związany z osobą uprawnioną do podejmowania decyzji. Oznacza to, że system musi umożliwiać podejmowanie decyzji *przy osobie* – w miejscu, gdzie aktualnie znajduje się osoba decydująca. Rodzi to wymagania co do transmisji wyników i transmisji decyzji do osób zajmujących się ich wykonaniem, a które mogą znajdować się w różnych miejscach. Z punktu widzenia systemów jakości zasadnicze znaczenie może tu mieć czas, w jakim odpowiednie decyzje zostaną podjęte i dotrą do adresatów. Prowadzi to do działania systemu według schematu ukazanego na rys. 6.

We wszystkich tych trzech sferach informatyka i teletransmisja rewolucjonizują dotychczasowe możliwości i stwarzają warunki kompleksowego zarządzania jakością niezależnie od miejsca i czasu budowy. Kluczowe znaczenie ma tu szybkość, z jaką obserwacje są dostarczane do centrali, a następnie możliwość podejmowania i przekazu decyzji niezależnie od miejsca, w którym znajduje się decydent i wykonawcy.

W obecnym czasie najlepszym rozwiązaniem jest oparcie całej teletransmisji na Internecie. Pozwala to na przesyłanie informacji między dowolnymi dwoma punktami na terenie całego kraju i w dowolnym czasie. Dwa zadania informatyczne – pomiar i analiza – z których jedno musi być wykonywane na placu budowy, a drugie w ośrodku obliczeniowym, dzięki Internetowi mogą być obecnie wykonywane w tym samym czasie – *on line*. Wyniki analiz mogą być przez Internet udostępniane decydującym niezależnie od ich miejsca pobytu (komputer stacjonarny, laptop lub telefon komórkowy), a ich decyzje po odnotowaniu w bazie danych w centrali również przez Internet mogą być wysłane do wszystkich zainteresowanych. Internet pozwala na wielodostęp do informacji przechowywanych w centrali bez ograniczeń co do liczby nadzorowanych budów, uczestników, modułów pomiarowych, jak też czasu. Taki system nadzoru będzie szczególnie przydatny do nadzorowania budowy obiektów wznoszonych według technologii konstrukcji masywnych. Koncepcja takiego centrum została przedstawiona na ubiegłorocznej konferencji Dni Betonu w Wiśle [27]. Budowa takiego systemu została już rozpoczęta.

Rys. 4. Formy wejściowe systemów obliczeniowych CONCRETE i SPD

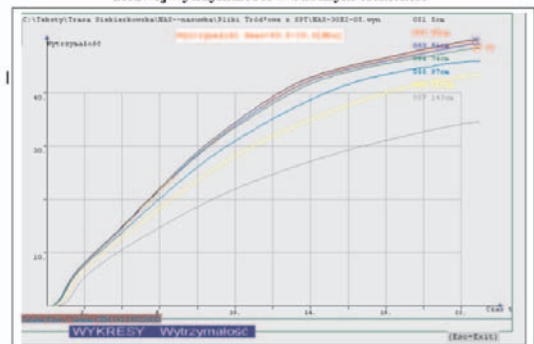


#### RAPORT Z BADANIA DOJRZAŁOŚCI BETONU

Nr 13/03

|              |                            |                    |                       |
|--------------|----------------------------|--------------------|-----------------------|
| Investycja:  | Most                       | Data betonowania:  | 24 kwietnia 2003      |
| Obiekt:      | Estakada WB-2              | ID betonowania:    | 135/TS/18/TE2/2003    |
| Element:     | Segment płyty jezdnej WB-2 | Rodzaj cementu:    | CEM I 42,5 R RUDNIKI  |
| Etap betonu: | IIa                        | Zawartość cementu: | 290 kg/m <sup>3</sup> |
| Punkt pom.:  | Środek długości segmentu   |                    |                       |

#### Rozwój wytrzymałości w badanym elemencie



| Time / godzin | Mr. czujnika / Foliozacja / Czas (h) | Ø110 | Ø115 | Ø120 | Ø125 | Ø130 | Ø135 | Ø140 |
|---------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 21/10 14:45   | 3-5                                  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| 02/11 05:30   | 19-3                                 | 3,7  | 7,1  | 6,3  | 6,9  | 8,9  | 8,9  | 8,9  |
| 02/11 09:00   | 36-8                                 | 13,3 | 17,8 | 17,4 | 20,3 | 20,8 | 20,8 | 20,8 |
| 02/11 16:30   | 88-2                                 | 19,4 | 21,8 | 21,6 | 23,1 | 23,3 | 23,3 | 23,3 |
| 03/11 13:00   | 79-8                                 | 21,3 | 23,1 | 23,0 | 24,2 | 24,5 | 24,5 | 24,5 |
| 04/11 09:30   | 30-2                                 | 23,1 | 24,0 | 24,0 | 25,0 | 25,3 | 25,3 | 25,3 |
| 05/11 05:00   | 110-0                                | 24,0 | 24,8 | 24,7 | 25,6 | 26,0 | 26,0 | 26,0 |
| 05/11 09:30   | 129-2                                | 24,7 | 25,5 | 25,4 | 26,2 | 26,5 | 26,5 | 26,5 |
| 05/11 16:00   | 147-8                                | 25,4 | 26,0 | 26,0 | 26,7 | 27,0 | 27,0 | 27,0 |
| 07/11 13:00   | 128-8                                | 26,1 | 26,6 | 26,6 | 27,3 | 27,9 | 27,9 | 27,9 |

Rys. 5. Przykładowy raport SPD z badania rozwoju wytrzymałości

## 5. Zakończenie

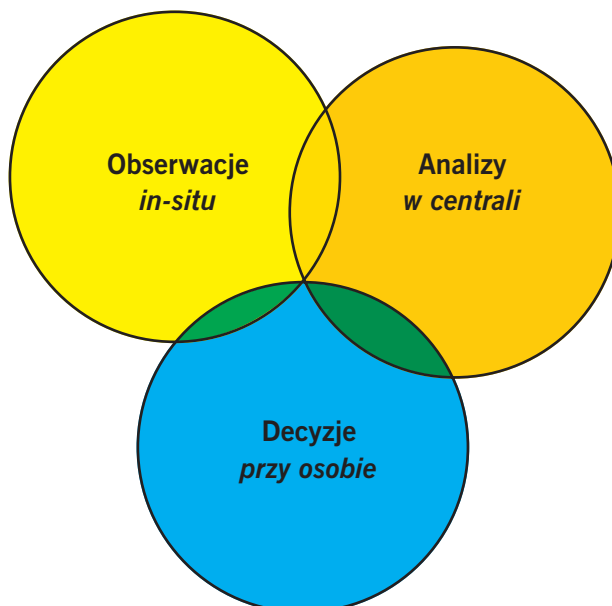
Przedstawiony system zdalnego nadzoru (jeszcze bez wersji internetowej) był stosowany przy nadzorze prowadzonym przez ITB na największych inwestycjach komunalnych w Warszawie (most Świętokrzyski, most Siekierkowski, tunel Wisłotrady, węzeł Czerniakowska i inne). Są też przykłady nadzoru prowadzonego na odległość 300 km. Prace rozwojowe w kierunku przekształcenia go w system internetowy zostały jednak zahamowane ze względu na brak środków.

Jednocześnie jednak prace nad stworzeniem podobnego systemu trwają w kilku ośrodkach zagranicznych. Najbardziej zaawansowane wyniki osiągnęło konsorcjum Germann Instruments z siedzibą w Kopenhadze i filiami w USA i Luksemburgu. Mimo dyskusyjnych podstaw teoretycznych, Germann Instruments rozwija same narzędzia do symulacji i pomiaru, i oferuje obecnie trzy różne systemy pokrywające wspólnie zakres tematyczny przedstawionych wyżej polskich systemów. Są to 4C-Temp – system symulacji rozwoju temperatury i 4C-Stress – system symulacji rozwoju naprężeń. Trzecim systemem jest system Guardian przeznaczony do pomiaru temperatur i wyznaczania dojrzałości na placu budowy. Na razie Germann Instruments nie weszło jeszcze w technologie bezprzewodowe i nie może prowadzić nadzorów zdalnie. Jednakże środki, jakimi firma dysponuje, wskazują, że wkrótce stanowić będzie konkurencję dla wcześniej stworzonych systemów polskich. Świadczy o tym rozgłos nadawany pracom firmy m.in. w publikacjach polskich [28, 29] i potęga międzynarodowego konsorcjum.

**prof. Piotr Witakowski**  
**Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie**

### Literatura

- 1 Polska Norma PN-B-03264: 2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie
- 2 „Thermal Cracking in Concrete at Early Ages”, Proceedings of the International RILEM Symposium, Munich October 10-12 1994
- 3 Röhling Stefan, *Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme*, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf 2005
- 4 P. Witakowski, *Awaria fundamentu wieżowca i jego naprawa*, Wyd. WEKA, Warszawa 2002
- 5 Polska Norma PN-88/B-06250 Beton zwykły
- 6 Norma PN-EN 206:2002 Beton zwykły
- 7 P. Witakowski, *Analiza naprężeń termicznych w masywach betonowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1977
- 8 P. Witakowski, *Wewnętrzne klinowanie struktury dojrzewającego betonu*, „Inżynieria i Budownictwo” 8/1997
- 9 P. Witakowski, *Projektowanie masywów betonowych z uwzględnieniem naprężeń termicznych. Etap III. Efekty mechaniczne w dojrzewającym betonie, praca wykonana w ramach Programu Rządowego PR-07, Zakład Doświadczalny TECHPAN przy IPPT Polskiej Akademii Nauk*, Warszawa 1984
- 10 P. Witakowski, *Metoda obliczania temperatur i naprężeń termicznych wywołanych ciepłem hydratacji cementu w blokach betonowych uwzględniająca cechy materiałowe i warunki wykonania, maszynopis powielony przez OBREL*, Warszawa 1985
- 11 P. Witakowski, A. Pietrzyk, *Thermal stresses caused by hydration heat of cement in massive concrete structures*, Transactions of The 9-th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lausanne, August 1987
- 12 A. Pietrzyk, P. Witakowski, *A study of thermal stresses development in maturing concrete*, Proceedings of The 5-th International Conference on Numerical Methods in Thermal Problems, Montreal 1987
- 13 P. Witakowski, *Termodynamiczna teoria dojrzewania. Zastosowanie do konstrukcji masywnych z betonu*, Politechnika Krakowska, zeszyt naukowy nr 1, Kraków 1998
- 14 M. Emborg, *Thermal Stresses in Concrete Structures at Early Ages*, Lulea University of Technology, 1989:73D



Rys. 6. Schemat działania internetowego systemu nadzoru

- 15 *Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, Proceedings of the International RILEM Symposium, Munich 1994
- 16 W. Kiernożycki, *Betonowe konstrukcje masywne*, Wyd. Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2003
- 17 E. Rastrup, *Heat of Hydration in Concrete*, Magazine of Concrete Research, vol. 6, nr 17, September 1954
- 18 L. Stoch, *Badanie kinetyki i wyznaczanie ciepła hydratacji metodami analizy termicznej*, „Cement, Wapno, Gips”, nr 3/1971
- 19 P. Freisleben Hansen, E. J. Pedersen, *Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete*, Journal of the Nordic Concrete Federation, No. 1:1977, Stockholm (w języku szwedzkim)
- 20 F. S. Rostasy, A. Gutsch, M. Laube, *Creep and Relaxation of Concrete at Early Ages – Experiments and mathematical Modeling*, Creep and Shrinkage of Concrete, Proc. of V-th Int. RILEM Symposium, Barcelona 1993
- 21 J. Byfors, *Plain concrete at early ages*, Swedish Cement and Concrete Research Institute at the Institute of Technology, Fo 3:80, Stockholm 1980
- 22 J. E. Jonasson, *Modelling of Temperature, Moisture and Stresses in Young Concrete*, Lulea University of Technology, Doctoral Thesis 1994:153 D, September 1994
- 23 P. Witakowski, D. Czamarska, J. Bobrowicz, *Skomputeryzowany układ do pomiarów kalorymetrycznych. Część I. Aparatura*, „Cement, Wapno, Gips” 7/1991
- 24 P. Witakowski, *Skomputeryzowane urządzenie do badania narastania wytrzymałości*, „Inżynieria i Budownictwo”, nr 10/1993
- 25 H. Kupfer, H. K. Hilsdorf, H. R(sch), *Behaviour of Concrete Under Biaxial Stresses*, American Concrete Institute Journal, vol. 66, August 1969
- 26 P. Witakowski, *Monitorowanie stanu termicznego konstrukcji betonowych podczas budowy i dojrzewania*, XIV Konferencja Naukowa – Korbiewów 2002 „Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, Wyd. Polit. Krak., Kraków 2002
- 27 P. Witakowski, *Internetowy system zarządzania jakością w budownictwie betonowym, materiały konferencyjne III Konferencji DNI BETONU – Tradycja i nowoczesność*, Wista, październik 2004
- 28 R. Gajewski, Ł. Szabat, *System symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji*, „Budownictwo, Technologie, Architektura”, Wyd. Polski Cement, nr 2/2005
- 29 R. Gajewski, Ł. Szabat, *System symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji – przykłady praktycznego zastosowania*, „Budownictwo, Technologie, Architektura”, Wyd. Polski Cement, nr 3/2005