

Ocena jakości betonu w budynku, który uległ katastrofie w wyniku przemrożenia betonu

Prof. dr hab. inż. Andrzej M. Brandt,
doc. dr hab. inż. Michał A. Glinicki,
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa



Artykuł był przedstawiony na XXII Konferencji Naukowo-Technicznej „Awarie Budowlane” w Międzyzdrojach, w maju 2005 r. Został opublikowany w Księżce Konferencyjnej na stronach 163–171.

1. Wprowadzenie

Wyjaśnienie przyczyny katastrofy budowlanej to rozwiązanie zagadnienia technicznego, które ma określone skutki materialne, prawne, a także karne i moralne. Stąd przy analizie różnych okoliczności katastrofy, krzyżują się nie tylko poglądy i wyniki badań, ale także interesy występujących stron. W przypadku katastrofy budynku garażowo-magazynowego, główne strony to: Inwestor, Wykonawca prowadzący budowę i Producent dostarczający beton towarowy. Interesy tych stron nie powinny jednak wpływać na techniczne oceny przyczyn katastrofy.

Niniejszy referat ma na celu przedstawienie zagadnień związanych z jakością betonu w segmencie konstrukcji budynku garażowo-magazynowego, którego katastrofa nastąpiła w styczniu 2003 r. w Warszawie i sposobem prowadzenia robót betonowych, natomiast pominięto oceny, dotyczące m.in. projektu konstrukcji.

Wpływ obniżonej temperatury na procesy zachodzące podczas wiązania i twardnienia betonu i na narastanie wytrzymałości betonu jest znany z wieloletnich doświadczeń i podstawowych podręczników technologii betonu. Odpowiednie wymagania podane są w normach i zaleceniach, powszechnie znanych, których nie ma potrzeby przytaczać, np. w Instrukcji ITB Nr. 282, [1].

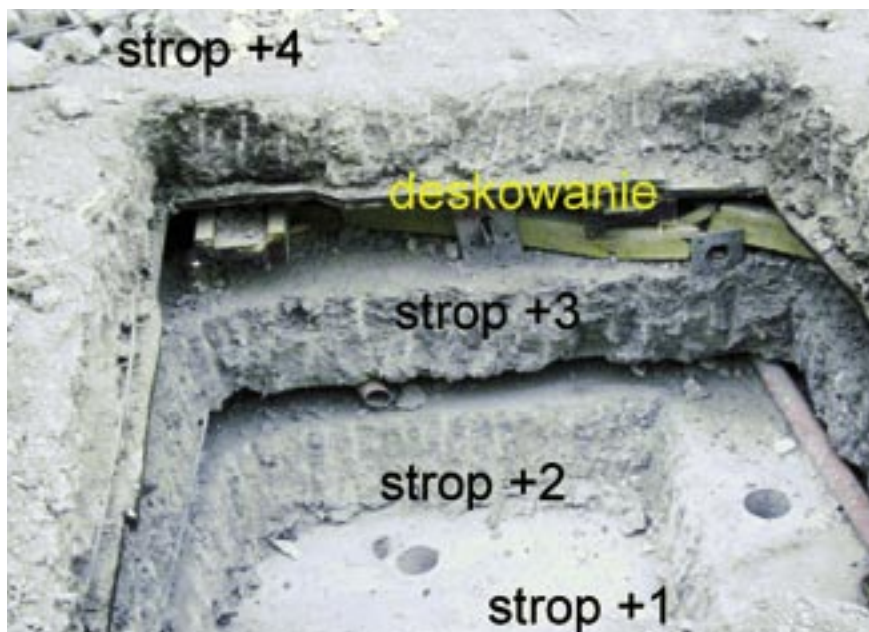
O zagrożeniach betonu w niskich temperaturach wiedziano już 80 lat temu i przepisy Ministerstwa Robót Publicznych z roku 1920 [2] zalecały: „W czasie zimowym przy temperaturze niżej 0°C należy przerwać roboty betonowe”. Wiele się od tego czasu zmieniło, ale nadal jeżeli woda zamraża w mieszance, to hydratacja cementu nie postępuje, a przejście wody w lód w częściowo stwardniałym betonie może spowodować nieodwracalne uszkodzenia jego struktury.

2. Prowadzenie robót betonowych w budynku

Ze względu na wpływ niskiej temperatury na wiązanie i dojrzewanie betonu, w przypadku prowadzenia robót betonowych w zimie konieczne jest podjęcie odpowiednich kroków, aby uniknąć uszkodzeń struktury i zmniejszenia wytrzymałości betonu. Jakie środki zastosowano na opisywanej budowie?

W wytwórni dodawano domieszkę Zimobet 334 do mieszanki betonowej w okresie grudnia 2002 r. i stycznia 2003 r., która jednak skutkuje tylko do temperatury nie niższej niż -5°C . Okoliczność ta jest znana z Karty Produktu Zimobetu 334 [3] i była przypomniana w piśmie skierowanym przez Producenta betonu do Wykonawcy konstrukcji na początku okresu mrozów. Nie odniosło ono pożądanego skutku, mimo że w okresie grudnia i stycznia temperatura spadała często poniżej -15°C , a dochodziła nawet do $-22,9^{\circ}\text{C}$. Dojrzewanie betonu z dodatkiem Zimobetu 334 przeprowadzono w warunkach niezgodnych z instrukcją podaną w [3], bo beton był wystawiony na bezpośrednie działanie mrozu. Wykonawca nie zastosował żadnych zabezpieczeń w postaci okrycia świeżego betonu odpowiednimi matami lub zbudowania cieplaków na betonowanych elementach. Takie zabezpieczenia mają na celu zatrzymanie ciepła hydratacji cementu i są powszechnie stosowane. Nie zastosowano również żadnego ogrzewania pomieszczeń ze świeżym betonem.

Na gruzach pozostałych po zniszczonym budynku stwierdzono brak jakichkolwiek zabezpieczeń w rodzaju mat czy cieplaków, czy urządzeń do nagrzewania powietrza nad betonowanymi elementami (rys. 1). Dodatkowa okoliczność charakteryzuje jakość wykonawstwa: podczas całego okresu betonowania konstrukcji pobierano systematycznie próbki na budowie i przechowywano je w bezpośrednim sąsiedztwie betonowanych elementów. Jednak w okresie od 31 grudnia 2002 r. do 16 stycznia 2003 r. zaprzestano badania tych próbek! Taka sytuacja jest sprzeczna nie tylko ze zdrowym rozsądkiem, ale także np. z wymaganiami PN-EN 206-1 [4]. Wszystkie próbki pobrane od 25 listopada do 21 grudnia, a więc podczas betonowania i zdejmowania



Rys. 1. Widok zawalanej części budynku ze wskazaniem miejsc pobrania próbek oraz fragment odkrywki pokazującej zwalone kolejne stropy

rusztowań w okresie niskiej temperatury, zbadano dopiero po katastrofie.

Na skutek tego postępowania, podejmowano decyzje na budowie o zdejmowaniu stojaków rusztowań na kolejnych piętrach i o postępie robót betonowych w całkowitej nieświadomości jaką wytrzymałość miał beton w stropach i słupach. Nawet, jeśli można mieć różne wątpliwości co do relacji między wytrzymałością takich próbek, a rzeczywistą wytrzymałością betonu w konstrukcji, to jednak badanie próbek w odpowiednim czasie, tzn. systematycznie po 28 dniach, dostarczyłoby informacji, że wytrzymałość betonu przemrożonego spadała systematycznie wraz z temperaturą powietrza i doszła do 8,6 MPa.

3. Jakość betonu towarowego dostarczonego przez Producenta

Producent stosował wyłącznie składniki betonu odpowiednie do klasy B30 i B35, co jest potwierdzone atestami. Temperatura betonu dostarczanego na budowę, która według PN-EN 206-1 [4] powinna wynosić co najmniej $+5^{\circ}\text{C}$ nie była poddawana w wątpliwość. Wytrzymałość betonu była systematycznie badana na próbkach pobieranych u Producenta i przechowywanych w normowych warunkach i odpowiadała całkowicie wymaganiom w klasach B30 i B35. Badania te były prowadzone przez niezależne laboratorium, wybrane zgodnie przez Wykonawcę i przez Producenta. Wyniki wskazują nie tylko na odpowiednią wytrzymałość na ściskanie, ale także na małą ich zmienność w kolejnych partiach betonu (rys. 2). Również przeprowadzone w laboratorium IPPT PAN badania makrostruktury i mikrostruktury betonu wykazały, że beton B30 i B35 dostarczany przez Producenta na budowę w okresie od października do grudnia 2002 r. był dobrej jakości, odpowiadającej wszystkim wymaganiom co do doboru składników i przygotowania mieszanki.

4. Jakość betonu w konstrukcji

W wyniku braku pielęgnacji betonu na budowie po ułożeniu w deskowaniu w temperaturze poniżej zera,

nastąpiły poważne uszkodzenia struktury materiału, a wytrzymałość w tych częściach konstrukcji budynku, które były narażone na przemrożenie podczas pierwszych godzin i dni dojrzewania betonu okazała się niedostateczna.

W opisywanym budynku beton dojrzewał w niskich temperaturach bez żadnych, jak wspomniano, zabezpieczeń. Wyniki badania wytrzymałości próbek przechowywanych na budowie wskazują wyraźnie jak spadała wytrzymałość w wyniku przemrożenia betonu (rys. 3). Badania wytrzymałościowe zostały potwierdzone przez badania struktury próbek, wyciętych z odwiertów pobranych ze stropów i słupów budynku. Próbki te poddano suszeniu i nasycono odpowiednio

przygotowaną żywicą z czynnikiem fluorescencyjnym. Zastosowana procedura badawcza została opisana m.in. w [5]. Na rysunku 4 pokazano przykładowy obraz mikrostruktury rys w górnej części płyty stropowej, w której nastąpiły uszkodzenia spowodowane przemrożeniem. Zmierzone długości i szerokości rys oraz parametry ich rozkładu w próbkach były zgodne z wcześniej uzyskanymi wynikami na próbkach intencjonalnie przemrożonych w laboratorium [5]. Na podstawie cyfrowej analizy struktury zarysowań wywołanych przemrożeniem (rys. 5) określono średnią głębokość przemrożenia, która okazała się znaczna zarówno w zawalonym segmencie budynku, jak też w części niezawalanej. Wzdłuż wysokości stropów wyróżnia się dwie zupełnie odmienne „klasy” betonu:

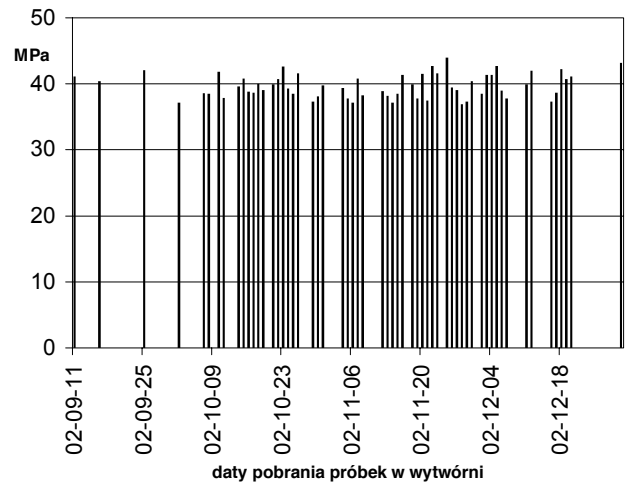
- do głębokości przemrożenia sięgającej do 90 mm, analizowany beton nie ma wartości materiału konstrukcyjnego ani nie stanowi warstwy otuliny niezbędnej dla zbrojenia,
- w pozostałych obszarach – poniżej granicy przemrożenia – beton jest wolny od istotnych defektów i rys, toteż jego przydatność jako materiału konstrukcyjnego nie budzi zastrzeżeń.

Mikrostruktura betonu w częściach konstrukcji budynku, które nie uległy przemrożeniu była prawidłowa, tj. na podstawie szczegółowych badań mikroskopowych nie stwierdzono niejednorodności betonu, defektów ani obszarów o podwyższonej porowatości kapilarnej wykraczających poza normalnie spotykane w betonach tej klasy. Potwierdza to wyniki wytrzymałościowe w okresie przed wystąpieniem mrozów.

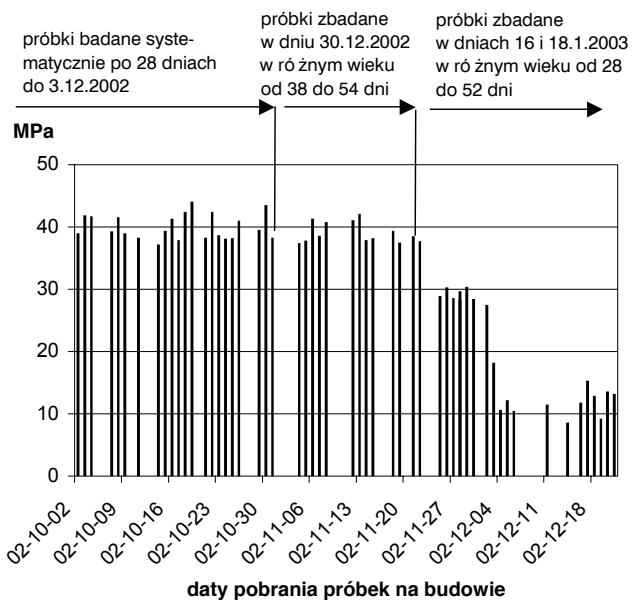
Badania wytrzymałości betonu na próbkach pobranych po katastrofie były prowadzone w kilku laboratoriach. Przedmiotem badań był beton w różnych elementach konstrukcji, również w elementach wykonanych znacznie wcześniej czyli w okresie temperatur dodatnich. Próbkę betonu w postaci odwiertów walcowych o nominalnej średnicy $\varnothing 100$ i $\varnothing 150$ mm pobrano z dostępnych elementów konstrukcji budynku: ze stropów i słupów w zawalanej części budynku (rys.1), z płyty fundamentowej oraz ze stropów sąsiedniej (niezawalanej) części budynku. Pobrano 39 próbek – odwiertów, które były następnie przechowywane w laboratorium do czasu przeprowadzenia badań wytrzymałościowych w Laboratorium Hydrobudowy-1 i strukturalnych w IPPT PAN.

Przy wycinaniu i badaniu odwiertów rdzeniowych stosowano zasady normy PN-EN 12504-1. Powierzchnie dociskowe zostały przygotowane za pomocą kapslowania z użyciem cementu wysokoglinowego. Badania wytrzymałości betonu na ściskanie przeprowadzono przy użyciu prasy wytrzymałościowej DP 1600 klasy I w dniu 7 marca 2003 r. Wyniki badania zestawione w tabeli 2 prowadzą do następujących wniosków:

- dobrą lub zadowalającą wytrzymałość betonu stwierdzono w częściach konstrukcji, które praw-



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie f_{28} betonu próbek pobranych w wytwórni w okresie od września do grudnia 2002 r. i dojrzewających w warunkach normowych



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie betonu próbek pobranych na budowie, tam przechowywanych w okresie od października do grudnia 2002 r. i dojrzewających w warunkach budowy. Próbkę były badane w różnym wieku, jak wskazano na rysunku

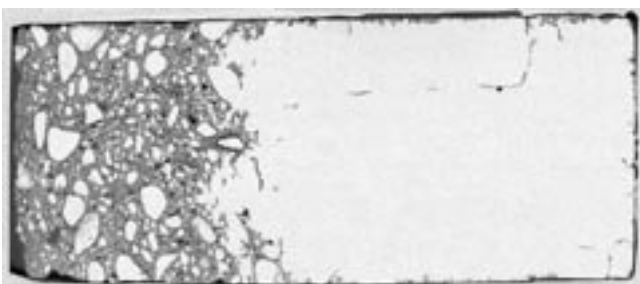
dopodobnie nie podlegały przemrożeniu podczas dojrzewania betonu,

- niedostateczną wytrzymałość betonu stwierdzono w częściach przemrożonych.

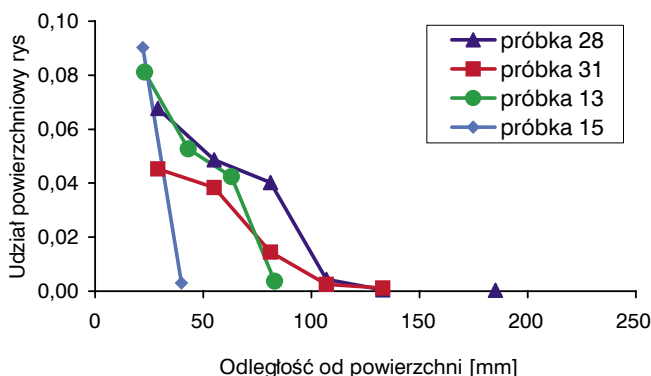
Wyniki te okazały się zgodne w wynikami badania makro i mikrostruktury pobranych próbek betonu.

Próbki betonu wycięte z dolnych części budynku wykazały wytrzymałości na ściskanie świadczące, że beton miał projektowaną klasę B35 lub wyższą. Przy elementach na poziomie od +2 w górę wytrzymałości betonu na ściskanie w próbkach były niższe od B35. Taka tendencja jest zgodna z wynikami badań

↓ – górna powierzchnia stropu



Rys. 4. Przykładowy obraz mikrostruktury uszkodzeń spowodowanych przemrożeniem (przekrój przez grubość stropu, wymiary powierzchni próbki 98x231 mm, badania wykonano w IPPT PAN w Warszawie)



Rys. 5. Udział powierzchniowy rys w próbkach betonu w funkcji odległości od górnej powierzchni stropów, tj. powierzchni eksponowanej na oddziaływanie mrozu (badania wykonano w IPPT PAN w Warszawie)

wykonanych zarobów próbnych, gdzie przy średniej temperaturze powietrza + 1,7°C spadek wytrzymałości wyniósł 43% przy stosowaniu cementu CEM II B-S/32,5R i 35% przy cementcie CEM I 32,5R. Próbkę z zarobów próbnych przechowywaną na powietrzu przez pierwsze 10 dni były pod wpływem temperatur ujemnych. Uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach 26,2 MPa dla cementu CEM II B-S 32,5R i 30,9 MPa dla cementu CEM I 32,5R należy uznać jako bardzo dobre, świadczące również o dodatnim wpływie domieszki Zimobet 334.

Próbki betonu wycięte z płyty fundamentowej po przeliczeniu wyników z próbki badanej na kostki 15x15x15 cm wykazały wytrzymałość na ściskanie: minimalną 36,7 MPa, średnią 42,5 MPa. Zatem wytrzymałość betonu w płycie spełnia wymagania klasy B35.

Wyniki niezależnego badania próbek betonowych, pobranych z płyty fundamentowej budynku w formie odwiertów walcowych o średnicy 150 mm, zostały przedstawione w raporcie [6], którego fragmenty przedstawiono w tabeli 2. Wartości wytrzymałości na ściskanie określone na 18 walcach o jednakowej wysokości i średnicy mieściły się w granicach od 36,9 do 45,4 MPa, co pozwoliło na kwalifikację partii betonu do klasy B30 i B35. Uzyskane wyniki potwierdzające

Tabela 1. Zestawienie wyników badania wytrzymałości betonu na ściskanie f_c w próbkach rdzeniowych (nominalna średnica i wysokość próbek 100 mm, z wyjątkiem próbek z płyty fundamentowej $\varnothing=h=150$ mm)

Część budynku	Lokalizacja elementu	f_c [MPa]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]
Część zawalona – słupy	słup poz. +1	47,7	2520*
		50,5	2580*
		43,8	2390
		47,2	2480*
		45,3	2520*
	słup poz. +2	49,4	2370
		35,1	2350
		36,7	2500*
	słup poz. +2	32,8	2350
		30,6	2380
		27,8	2360
		32,6	2350
słup poz. +3	32,4	2330	
	40,3	2360	
	37,5	2416*	
	37,6	2340	
Część zawalona – stropy	strop poz. +2	36,0	2450*
		40,4	2450*
	strop poz. +3	19,9	2290
		26,1	2330
		24,7	2310
	strop poz. +3	22,2	2280
Część zawalona – płyta fundamentowa	płyta fundamentowa	44,1	2330
		31,9	2310
		32,6	2350
		39,2	2310
Część niezawalona – stropy	strop poz. +2 (+2A'E)	29,9	2320
		32,5	2340
	strop poz. +1 (+1A'E)	21,5	2240*
		28,9	2290*
		24,6	2380
	strop poz. -1	43,8	2310
		41,8	2350*
		43,4	2330
		29,4	2340

* pręty zbrojenia w próbce

uzyskanie projektowanej klasy betonu były zgodne z wynikami badań laboratorium Hydrobudowy-1. Laboratoryjną kontrolę recept mieszanki betonowej B35 przeprowadzono w celu weryfikacji wyników badania betonu w konstrukcji. W dniu 24 lutego 2003 r. wykonano 2 próbne zaroby betonów z materiałów stosowanych przez producenta betonu, wykonano z nich próbki normowe do badania na ściskanie i przeprowadzono takie badania. Celem tych prac było:
– kontrola recept przez doświadczalne sprawdzenie własności technologicznych mieszanek;

Tabela 2. Zestawienie wyników badania wytrzymałości betonu na ściskanie w próbkach rdzeniowych pobranych z płyty fundamentowej budynku parkingowego [6]

Wytrzymałość na ściskanie f_c [MPa]	43,2	39,4	45,3	40,1	43,0	43,5	42,7	41,6	42,5	39,3	44,8	45,4	38,2	38,7	38,2	36,9	41,2
Gęstość objętościowa [kg/m ³]	2338	2290	2297	2239	2320	2306	2305	2271	2272	2327	2298	2331	2286	2330	2259	2299	2300

Tabela 3. Zestawienie średniej wytrzymałości na ściskanie próbek betonu przechowywanych w warunkach normowych i warunkach naturalnych od 24 lutego 2003 r. (kostki 150 mm, wartość średnia z 3 próbek)

Oznaczenie serii próbek	Wytrzymałość na ściskanie [MPa] betonu po dojrzewaniu przez:			
	7 dni	28 dni	60 dni	28 dni w war. naturalnych
R-29/2003 CEM II 32,5	29,6	46,0	48,1	26,2
R-30/2003 CEM I 32,5 R	37,6	47,5	49,2	30,9

– porównanie uzyskanych wytrzymałości na ściskanie z wymaganiami odbiorcy betonu;

– stwierdzenie wpływu warunków dojrzewania próbek na uzyskiwane wytrzymałości.

Uzyskane wytrzymałości próbek zestawione są w tabeli 3 w postaci wartości średnich z 3 próbek kostkowych o boku 150 mm.

Na podstawie wyników badań sformułowano następujące wnioski:

– mieszanki betonowe wykonane według dwóch recept stosowanych przez Producenta wykazały poprawną urabialność i odpowiednią konsystencję;

– uzyskane wytrzymałości na ściskanie po 7, 28 i 60 dniach przechowywania w warunkach normowych odpowiadały wymaganiom, a w szczególności po 28 dniach uzyskano z nadmiarem wytrzymałości wymagane w klasie B35;

– próbki przechowywane na zewnątrz laboratorium w temperaturze zmiennej w granicach od -11°C do $+15^{\circ}\text{C}$ (przy dwukrotnym pomiarze temperatury w ciągu doby średnia wynosiła $+1,7^{\circ}\text{C}$) uzyskały wytrzymałości odpowiadające klasom B20 i B25;

– dojrzewanie próbek betonu wystawionych bezpośrednio po zaformo-

waniu na niską temperaturę zostało poważnie zakłócone i opóźnione. Okazuje się, że dojrzewanie betonu z dodatkiem Zimobetu 334 w warunkach niezgodnych z instrukcją, bo wystawionego bezpośrednio na działanie mrozu, bez odpowiedniego zabezpieczenia temperatury dodatkowo „...oraz starannego okrywania świeżo ułożonego betonu”, powoduje znaczne obniżenie wytrzymałości. Takie zalecenie jest 2-krotnie podane w Karcie Produktu [3], dostarczanej z każdą partią Zimobetu 334, a przestrzegania „...zasad wykonywania robót w okresie obniżonych temperatur...” wymaga także Aprobata Techniczna [7]. W Aprobacie [8] zastrzeżono, że stosowaniu tej domieszki „...powinny towarzyszyć inne zabiegi technologiczne umożliwiające opóźnienie zamarzania świeżej mieszanki...”.

5. Uwagi końcowe

Zasady prowadzenia robót betonowych w niskiej temperaturze są znane od lat, a obowiązujące przepisy zawierają odpowiednie wymagania i wskazówki, aby nie dochodziło do awarii. Prowadzenie takich robót powinno uwzględniać wspomniane zasady i wymagania. Do tego

potrzebna jest nie tylko ich znajomość przez personel na budowie, a także unikanie sytuacji, w których lekceważenie może wynikać z pośpiechu, nadmiernej oszczędności i innych pozatechnicznych względów.

W opisywanym przypadku awarii nastąpiły wyraźne błędy prowadzenia robót betonowych:

- nie zastosowano żadnej ochrony świeżego betonu, pozostawionego w niskiej temperaturze,
 - nie kontrolowano wytrzymałości betonu w okresie niskiej temperatury i podejmowania decyzji o dalszym postępie robót.
- Te dwa błędy były bezpośrednią przyczyną awarii.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Wytyczne wykonania robót budowlano-montażowych w okresie obniżonych temperatur, Instrukcja nr 282, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1988
- [2] Tymczasowe przepisy budowy i utrzymania mostów drogowych. Ministerstwo Robót Publicznych, Warszawa 1920, s. 68.
- [3] Karta Produktu Zimobet 334, Przeds.Inn.-Wdroż. LUBANTA S.A.
- [4] PN-EN 206-1 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. PKN, Warszawa 2003
- [5] Glinicki M. A., Litorowicz A., Cyfrowa analiza rys w betonie wywołanych przez działanie termiczne, Konferencja Naukowo Techniczna „Beton i prefabrykacja – Jadwisin 2002”, CEBET, Tom 1, 112–119
- [6] Raport z badań nr LW-1023/03, Zespół Laboratoriów Badawczych Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa, 26.06.2003, 2 s.
- [7] Aprobata Techniczna Instytutu Badawczego Dróg i Mostów Nr AT/2000-04-0814, 2000
- [8] Aprobata Techniczna Instytutu Techniki Budowlanej AT-15-4897/2001, 2001

PODZIĘKOWANIE

Autorzy dziękują mgr inż. Agnieszce Litorowicz z IPPT PAN za przeprowadzenie cyfrowej analizy mikrostruktury rys w próbkach betonu.