PIOTR WOYCIECHOWSKI[1)]
PAWEŁ ŁUKOWSKI[i2)]
GRZEGORZ ADAMCZEWSKI[3)]

THERMAL SHOCK AS A CAUSE OF CRACKING OF CONCRETE IN MASSIVE BRIDGE SUPPORT ELEMENTS - A CASE STUDY

SZOK TERMICZNY JAKO PRZYCZYNA ZARYSOWAŃ BETONU W ELEMENTACH PODPÓR MASYWNYCH OBIEKTÓW MOSTOWYCH - STUDIUM PRZYPADKU

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono przykładową analizę zarysowań betonu powstałych w trakcie wykonywania masywnego elementu obiektu mostowego wraz z prezentacją eksperckich prac diagnostycznych mających na celu kompleksową ocenę przyczyn ich powstawania. W badaniu wykorzystano oprogramowanie do analizy metodą elementów skończonych FE-tool ConTeSt Pro. Ponieważ w przedstawionym przypadku wystąpiły typowe wątpliwości co do źródła powstania zarysowań przeprowadzono analizę, która wskazała na szok termiczny jako podstawową przyczynę stwierdzonych uszkodzeń. W celu analizy wpływu temperatury na rozwój zarysowań elementów obiektu mostowego zastosowano symulacje numeryczne metodą elementów skończonych. Przedstawioną w pracy kompleksową analizę przypadku traktować można jako wytyczne stosowania metod analizy naukowej w praktycznej diagnostyce zarysowań elementów żelbetowych. Przeprowadzone badania wskazały na szok termiczny jako podstawową przyczynę uszkodzeń elementów mostowych z betonu masywnego.

SŁOWA KLUCZOWE: betonowy obiekt mostowy, zarysowania, pielęgnacja betonu masywnego, szok termiczny.

ABSTRACT. The paper presents an example of analysis of concrete cracking during construction of a massive bridge element, together with a demonstration of the expert diagnostic work aimed at a comprehensive assessment of the causes of crack development. The finite elements method analysis software FE-tool ConTeSt Pro was used. In the presented case there were typical doubts as to the reason of concrete cracking, and the performed analysis enabled identification of thermal shock as the primary cause of the observed distress. Finite element numerical simulations were adopted in order to analyze the temperature impact on crack development in the bridge elements. The complex case study analysis presented in the article may be treated as guidance on the use of scientific analysis methods in practical reinforced concrete cracking diagnostics. As a result of the work, thermal shock was identified to be the main reason for the damage of the massive bridge elements.

KEYWORDS: concrete bridge, cracking, mass concrete curing, thermal shock**.**

DOI: 10.7409/rabdim.020.019

[1)] Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; p.woyciechowski@il.pw.edu.pl (✉)
[2)] Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej; p.lukowski@il.pw.edu.pl
[3)] Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej; g.adamczewski@il.pw.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Zarysowania młodego betonu są problemem często występującym w praktyce budowlanej, z towarzyszącymi w wielu przypadkach wątpliwościami co do przyczyn ich powstania, zagrożeń jakie powodują oraz metod naprawy. Precyzyjne ustalenie przyczyn zarysowań jest szczególnie ważne z punktu widzenia prawidłowości diagnostyki i napraw oraz, w szczególności, w celu uniknięcia podobnych sytuacji w przyszłych realizacjach. Problematyka została szeroko omówiona w literaturze przedmiotu, głównie w zakresie prawidłowego projektowania oraz doboru rozwiązań materiałowych pomagających ograniczyć ryzyko powstawania zarysowań. Występowanie rys w ograniczonym zakresie (pod względem liczby, szerokości oraz zasięgu) jest naturalnym i akceptowalnym zjawiskiem charakterystycznym dla konstrukcji żelbetowych. Jednocześnie, zarysowania o dużej intensywności stanowią zazwyczaj poważny problem z potencjalnie negatywnym wpływem na nośność i stabilność, jak również trwałość konstrukcji. W przypadku wystąpienia rys o rozwarciu przekraczającym warunki określone dla danej konstrukcji uczestnicy procesu budowlanego mają często problem ze wskazaniem właściwych przyczyn ich wystąpienia, do których należeć mogą m.in. skurcz betonu i zjawiska termiczne zachodzące w stwardniałym betonie. Ustalenie przyczyn powstania rys ma podstawowe znaczenie dla oceny zagrożeń oraz wskazania odpowiednich środków zaradczych. W artykule przedstawiono przykładową analizę zarysowań betonu w trakcie wykonywania masywnego elementu obiektu mostowego wraz z przedstawieniem procedury śledztwa inżynierskiego (ang. *forensic engineering*) [1] przeprowadzonej w celu kompleksowej oceny przyczyn powstania zarysowań. W przedstawionym przypadku wystąpiły typowe wątpliwości co do źródła zarysowań a przeprowadzona analiza naukowa wskazała na szok termiczny jako podstawową przyczynę stwierdzonych uszkodzeń. Przedstawiony w artykule sposób przeprowadzenia analizy może, zdaniem autorów, służyć jako wytyczna stosowania metod analizy naukowej w praktycznej diagnostyce zarysowań elementów żelbetowych.

2. PRZYCZYNY POWSTAWANIA ZARYSOWAŃ W MŁODYM BETONIE

Przeprowadzając analizę przyczyn powstawania spękań ustalić należy, na jakim etapie powstawania konstrukcji miały one swój początek [2]. Z punktu widzenia początkowego etapu powstawania spękań wyszczególnić można trzy fazy dojrzewania betonu: beton świeży po zagęszczeniu ale jeszcze przed końcem wiązania, młody beton o mierzalnej (choć niskiej) wytrzymałości i w końcu beton stwardniały (Tabl. 1). Granice czasowe tych faz nie są stałe i zależą od szeregu czynników

1. INTRODUCTION

The problem of young concrete cracking is frequently encountered in concrete construction practice and often raises doubts about the causes, hazards and remedial methods. To ensure valid diagnostics and repairs and especially, to avoid similar events in subsequent implementations - it is particularly important to accurately determine the causes of cracking. The literature on the subject is extensive, primarily in the field of correct design and selection of material solutions that help to reduce the risk of cracking. Occurrence of cracks to a limited extent (limited number, width and range of cracks) is a natural and acceptable characteristic of reinforced concrete structures. Intense cracking, however, is usually a serious problem that can affect both the load capacity and stability of the structure, as well as its durability. In the case of occurrence of cracks whose opening exceeds the requirements formulated for a given structure, the participants of the construction process often have difficulty distinguishing the causes of cracks, which may include, among others, concrete shrinkage or thermal phenomena occurring in hardening concrete. Determination of the causes is crucial to risk assessment and identification of adequate countermeasures. The paper presents an example of analysis of concrete cracking during the construction of a massive bridge element, together with a demonstration of a "forensic engineering procedure" [1] carried out by the authors, which was aimed at a comprehensive assessment of the causes of crack development. In the presented case, there were typical doubts as to the reason of concrete cracking, and the scientific analysis presented below enabled identification of thermal shock as the primary cause of element damage. The manner of analysis presented in the article may be, in the opinion of the authors, a guidance on the use of scientific analysis methods in practical reinforced concrete cracking diagnostics.

2. CAUSES OF YOUNG CONCRETE CRACKING

When analyzing the reasons for the creation of cracks, it is necessary to determine at what stage of development of the concrete structure the formation of the cracks begun [2]. In terms of the origin of cracks, three phases of concrete development can be distinguished: fresh concrete after compaction but before the end of setting, young concrete with measurable (but low) strength and, finally, hardened concrete (Table 1). Time limits for these phases are not constant and depend on a set of internal and external factors, such as ambient conditions and material characteristics [3].

wewnętrznych i zewnętrznych, takich jak warunki otoczenia oraz charakterystyka materiału [3]. W typowych warunkach, pierwsza faza trwa kilka godzin, druga do kilku dni a trzecia latami. Długość tych faz zależy przede wszystkim od parametrów spoiwa, współspoiwa oraz zastosowanych domieszek, jak również od warunków pielęgnacji i dojrzewania betonu. W przypadku młodego betonu wśród szczególnie istotnych czynników odpowiedzialnych za powstawanie zarysowań wymienia się skurcz podczas wiązania oraz wczesny skurcz termiczny. Skurcz podczas wiązania jest złożonym zjawiskiem, na które składa się proces hydratacji (objętość hydratów jest mniejsza od sumy objętości substratów tej reakcji) oraz utrata wilgoci z betonu, szczególnie w wyniku jej transportu między warstwami układanymi w pewnych odstępach czasu wskutek wchłaniania wody ze świeżo ułożonej mieszanki przez ułożoną wcześniej suchą warstwę, co prowadzi do nierównomiernego skurczu.

Under typical conditions, the first phase lasts for several hours, the second – up to several days, and the third – for years. These limits depend primarily on binder, co-binder and admixture characteristics as well as on curing and hardening conditions. For young concrete, particularly important factors that may cause cracking include setting shrinkage and early thermal contraction. Setting shrinkage is a complex phenomenon and includes both hydration process (the volume of hydrates is lower than the sum of the volumes of the reactants of this reaction) as well as drying of the concrete, in particular the transport of moisture between layers placed at intervals – the dry layer that was placed previously can receive water from the freshly laid layer, which results in uneven progress of the contraction phenomena.

Table 1. Causes of cracks occurring in different phases of concrete hardening
Tablica 1. Przyczyny powstawania rys w różnych etapach twardnienia betonu

Microstructure development phase Faza powstawania mikrostruktury	Phenomena which are the main causes of cracking Zjawiska będące podstawowymi przyczynami powstawania rys	Typical time of occurrence of the phenomenon Typowy czas wystąpienia zjawiska
Concrete after compaction, before the final setting Mieszanka betonowa po zagęszczeniu i przed końcem wiązania	Mix settlement – excessive bleeding, rapid early drying Osiadanie mieszanki – nadmierny wypływ mleczka cementowego, gwałtowne wczesne wysychanie	Up to 3 h Do 3 godz.
	Plastic shrinkage – intensive drying Skurcz plastyczny – intensywne wysychanie	From 1 h to 6 h Od 1 do 6 godz.
	Setting shrinkage – chemical contraction and early autogenous shrinkage Skurcz przy wiązaniu – skurcz chemiczny i wczesny skurcz autogeniczny	From 4 h to 24 h Od 4 do 24 godz.
Young concrete with low but measurable strength Młody beton o niskiej ale już mierzalnej wytrzymałości	Early freezing after concreting Wczesne zamarznięcie po betonowaniu	Before resistance to freezing is developed Przed wytworzeniem wytrzymałości na zamarzanie
	Thermal phenomena – excessive heat generation, excessive thermal gradient, rapid cooling, uneven heat loss – internal stresses caused by heterogeneous temperature field and limited freedom of deformation Zjawiska termiczne – nadmierna ilość powstającego ciepła, zbyt wysoki gradient, gwałtowne ochłodzenie, nierówne odprowadzanie ciepła – wewnętrzne naprężenia wywołane niejednorodnym polem temperatury i ograniczoną swobodą odkształceń	Up to 24 hours typically, but sometimes up to 2-3 weeks, depending on concrete temperature changes in time Typowo do 24 godz. choć czasami nawet do 2-3 tyg. w zależności od zmian temperatury betonu w czasie
	Cracks generated by mold/framework deformation Rysy powstałe wskutek odkształcenia form/konstrukcji	Several hours Kilka godzin
Hardened concrete Stwardniały beton	Drying shrinkage – moisture release to the environment Skurcz wskutek wysychania – odprowadzenie wilgoci do otoczenia	Days, weeks, months – from demolding/exposure of the concrete surface Dni, tygodnie miesiące od rozdeskowania / odsłonięcia powierzchni betonu
	Other phenomena and processes – e.g. concrete or reinforcement corrosion, load and stress concentration, environmental phenomena Inne zjawiska i procesy – np. korozja betonu lub zbrojenia, koncentracja obciążeń lub naprężeń, oddziaływania zewnętrzne	Years Lata

3. RYSY TERMICZNE W MŁODYM BETONIE

Rysy powstające w wyniku zjawisk termicznych są powszechnie występującą przyczyną uszkodzeń betonu w trakcie twardnienia. Mogą one powstać w wyniku różnic temperatury w przekroju elementu betonowego. Do zarysowania dochodzi w przypadku przekroczenia krytycznej wartości gradientu temperatury tj. wartości wywołującej odkształcenia przekraczające granicę wytrzymałości na pękanie. Zjawisko to może również być wynikiem nagłego wystąpienia dużej różnicy temperatury między powierzchnią betonu a otoczeniem. Sytuację taką określa się mianem szoku termicznego [4-6].

Powstawanie rys w młodym betonie w wyniku zjawisk termicznych dotyczy w większości przypadków konstrukcji masywnych. W literaturze przedmiotu [7] kryterium stosowanym przy zaliczaniu konstrukcji do masywnych jest tzw. współczynnik masywności. Wyznacza się go zazwyczaj jako stosunek całkowitej powierzchni elementu do objętości betonu (P/V) przyjmując 2 m^{-1} jako wartość maksymalną dla uznania konstrukcji za masywną [8-10]. Alternatywnym współczynnikiem masywności stosowanym często w specyfikacjach technicznych jest przyjmowany dla danego kryterium najmniejszy wymiar elementu (np. wymiar minimalny > 0.9 m według [11]). Wytyczne ACI [12, 13] nie podają wymiernego kryterium. Beton masywny definiuje się jednak podobnie tj. jako pewną objętość betonu o wymiarach na tyle dużych, że wymagane jest zastosowanie środków przeciwdziałających powstawaniu rys wskutek zmian objętości wywołanych powstawaniem ciepła w procesie hydratacji cementu. Podejście takie prowadzi do wniosku, że zarysowania termiczne mogą występować w szerszej grupie konstrukcji niż tylko w konstrukcjach zaliczonych do masywnych na podstawie wartości współczynnika masywności. Duża różnica temperatury między powietrzem a powierzchnią świeżo ułożonej mieszanki skutkuje powstaniem dużego gradientu w strefie przypowierzchniowej betonu w relatywnie krótkim czasie, prowadząc do powstania zarysowań po przekroczeniu wartości granicznej odkształceń (Rys. 1).

Zarysowanie nastąpi w przypadku, gdy egzotermiczność procesu hydratacji spowoduje powstanie w przekroju niejednorodnego pola temperatury o gradiencie generującym wewnętrzne naprężenia przekraczające chwilową wytrzymałość na rozciąganie młodego betonu. Powyższe zjawisko zwane jest powstawaniem wczesnych rys termiczno-skurczowych. Dopuszczalne wartości gradientu temperatury w betonie podano w wielu publikacjach (m.in. [7, 11-14]). Przekroczenie tych wartości oznacza wysokie ryzyko powstania rys termicznych.

3. THERMAL CRACKS IN YOUNG CONCRETE

Cracks caused by thermal phenomena are a common cause of concrete distress during hardening. They may develop as a result of temperature difference occurring along the cross section of the element. If the temperature gradient in the cross section exceeds the critical value, i.e. one at which the deformation of the concrete exceeds the cracking threshold – a crack is formed. This phenomenon is also possible if an excessive temperature difference between the concrete surface and the external environment occurs suddenly. This case is known as thermal shock [4-6].

Thermal phenomena as cause of young concrete cracking are usually associated with massive structures. In technical literature [7] the so-called massiveness factor is used to identify such structures. It is usually defined by the ratio of the total surface area of the element to the concrete volume (P/V), and the maximum value of the ratio which means that the structure is massive equals 2 m^{-1} [8-10]. Alternatively, technical specifications often use the smallest dimension of the element as the indicator of its massiveness, with different criterion values (e.g. minimum dimension > 0.9 m according to [11]). In the ACI guidelines [12, 13] there is no measurable criterion. The definitions are similar: mass concrete means any volume of concrete with dimensions large enough to require that measures be taken to cope with the generation of heat from hydration of cement and attendant volume change to minimize cracking. This approach leads to the conclusion that thermal cracks can occur in a wider range of structures than only those which are considered massive according to the massiveness factor criterion. A significant difference between the air temperature and the temperature of the newly exposed concrete surface causes a large gradient in the concrete surface zone in a relatively short time, which leads to exceeding of the limit deformation in this zone, i.e. to formation of cracks (Fig. 1).

If the hydration exothermy creates a heterogeneous temperature field in the cross section, with a gradient generating internal stresses which exceed the momentary tensile strength of the young concrete – cracking occurs. This phenomenon is known as early thermal contraction cracking effect. In many literature sources (e.g. [7, 11-14]), limit values of the permissible temperature gradient in concrete are given. Exceeding these values causes high risk of concrete thermal cracking. The following maximum temperature gradient values that do not cause cracking are defined:

Maksymalne wartości gradientu temperatury, które nie powodują powstawania zarysowań podane zostały przez:

- NRMCA (Amerykańskie Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego [15])

„… wprowadzenie granicznego gradientu temperatury jest próbą ograniczenia nadmiernych zarysowań wywołanych nierównomiernymi zmianami objętości. Często przyjmuje się graniczną wartość na poziomie 19°C/m (35°F/m)".

- Kiernożycki W. [7]

„... dopuszczalny gradient temperatury w przekroju elementu wynosi 15-20°C/m".

- Witakowski P. [9]

„... w warunkach braku swobody odkształceń konstrukcji nie należy dopuszczać do przyrostów temperatury powyżej 20°C".

Podobne zalecania znaleźć można w szeregu innych wytycznych, książek i artykułów [10, 16-19].

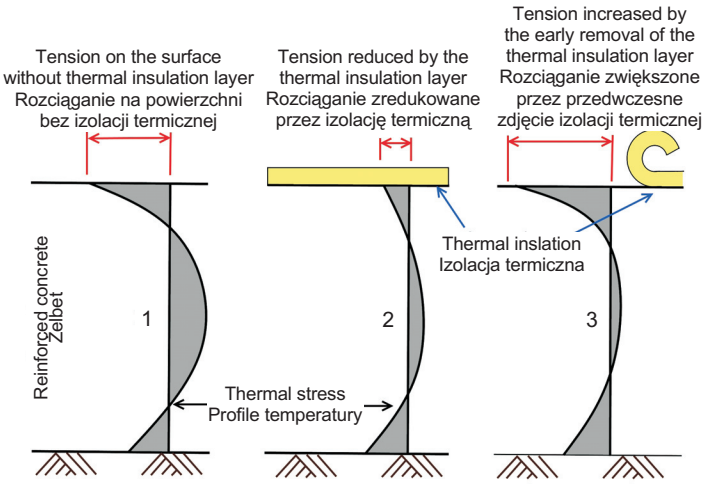

Fig. 1. Stress distribution in the cross section due to thermal shock in the surface zone of concrete element caused by premature removal of thermal insulation in winter conditions [10]
Rys. 1. Rozkład naprężeń wywołanych szokiem termicznym w strefie powierzchniowej w wyniku przedwczesnego zdjęcia termoizolacji w warunkach zimowych w przekroju elementu betonowego [10]

Graniczna wartość gradientu temperatury na poziomie około 20°C/m wynika z wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej betonu, która wynosi około $10 \times 10^{-6}/°C^{-1}$. W ten sposób dwie strefy betonu, między którymi występuje różnica temperatury $\Delta T = 20°C$ odkształcają się w różnym stopniu, a różnicę tę oblicza się w następujący sposób: $10 \times 10^{-6}/°C^{-1} \times \times 20°C \times 100\% = 200 \times 10^{-6} \times 100\% = 0{,}02\% = 0{,}2‰$, która to wartość, jak podaje Neville [20], jest maksymalną wartością graniczną odkształcenia betonu podczas rozciągania. Osiągnięcie tej wartości prowadzi do inicjacji rys w betonie i stąd

- National Ready Mixed Concrete Association [15]

"… introducing a temperature gradient limit is an attempt to limit excessive cracking associated with differences in volume changes. A limit of 19°C/m (35°F/m) is often used".

- Kiernożycki W. [7]

"... the permissible temperature gradient in the section of the element is 15-20°C/m".

- Witakowski P. [9]

"... in the case of lack of freedom of deformation of the structure, temperature increases greater than 20°C should not be allowed".

Similar recommendations are given in many other guidelines, books and papers [10, 16-19].

Adopting a temperature gradient limit value of about 20°C/m is related to the fact that the coefficient of thermal expansion of concrete is approximately $10{\times}10^{-6}/°C^{-1}$. Thus, two regions of concrete with a temperature difference $\Delta T = 20°C$ are deformed to a different degree, and the difference can be calculated as follows: $10 \times 10^{-6}/°C^{-1} \times \times 20°C \times 100\% = 200{\times}10{\times}100\% = 0.02\% = 0.2‰$, which, according to Neville [20], means the maximum limit value of concrete strain under tension. Achieving this value leads to initiation of concrete cracking, therefore it can be concluded that temperature difference of ca. 20°C/m generates deformation sufficient to develop cracks in a concrete element. The values of 0.2‰ and 20°C/m are arbitrary, but the latter is often used in technical specifications of massive structures. The actual value of temperature gradient causing cracks in a particular case may vary, depending on the actual thermal expansion coefficient, the tensile elasticity modulus and the degree of restriction of deformation [4, 21].

4. EXAMPLES OF THERMAL CRACKING OF EARLY AGE CONCRETE

Thermal shock is identified as a reason of concrete cracking in various circumstances related to both massiveness of the structure and significant heat of hydration, as well as sudden fluctuations of air temperature above the surface of hardening concrete, including structures that are not classified as massive. Numerous examples of thermal cracking cases, including massive structures, are analyzed, among others, in the work of Flaga and Klemczak [4].

Du and Stabel [22] discuss in detail the case of cracking of massive blocks of the Baglihar dam in Kashmir (India). Blocks with a thickness of 1 m to 3 m were concreted

można stwierdzić, że różnica temperatury na poziomie około 20°C/m wywołuje odkształcenia wystarczające do rozwoju zarysowań w elemencie betonowym. Choć wartości 0.2‰ i 20°C/m mają charakter arbitralny, to druga z nich często podawana jest w specyfikacjach technicznych dotyczących betonowych konstrukcji masywnych. Dokładna wartość gradientu temperatury wywołująca zarysowania może różnić się w konkretnych przypadkach w zależności od wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej, modułu sprężystości przy rozciąganiu oraz stopnia ograniczenia swobody odkształceń [4, 21].

4. PRZYKŁADY ZARYSOWAŃ TERMICZNYCH MŁODEGO BETONU

Szok termiczny uznaje się za przyczynę zarysowań betonu w różnych okolicznościach związanych z masywnością konstrukcji, znacząco wysokim ciepłem hydratacji oraz gwałtownymi wahaniami temperatury powietrza nad powierzchnią twardniejącego betonu, również w przypadku konstrukcji nie zaliczanych do masywnych. Liczne przykłady przypadków zarysowań termicznych, również w konstrukcjach masywnych zostały poddane analizie m.in. w pracy K. Flagi i B. Klemczak [4].

Du i Stabel [22] szczegółowo omawiają przypadek zarysowań masywnych bloków zapory Baglihar znajdującej się w Kaszmirze w Indiach. Bloki o grubości od 1 do 3 m betonowano w ciągu 4 tygodni w temperaturze otoczenia 25°C to 40°C. Maksymalna temperatura zmierzona w przekroju elementu betonowego wyniosła 37°C. Wskutek problemów technicznych na budowie, wykonane bloki betonowe zostały przedwcześnie zalane wodami rzeki o średniej temperaturze 10-11°C (woda była chłodniejsza gdyż pochodziła ona z topnienia śniegu w nieodległych Himalajach). Choć nie podano dokładnej lokalizacji maksymalnej zmierzonej temperatury, to jednak przyjmując punkt pomiaru w połowie wysokości najgrubszego bloku otrzymamy gradient temperatury na poziomie przynajmniej:$(37 - 11) / (\frac{1}{2} \times 3) = \sim 17{,}5$°C/m. Gdyby równie wysoka temperatura wystąpiła w przekroju niższego bloku (1 m lub 2 m), wówczas gradient mógłby osiągnąć wartość $(37 - 11) / (\frac{1}{2} \times 2) = 26$°C/m lub nawet $(37 - 11) / (\frac{1}{2} \times 1) = 52$°C/m. W rezultacie, wskutek szoku termicznego powstały rysy biegnące przez całą wysokość bloków.

Nasu w pracy [23] omawia przypadek powstania rys w fundamentach mostu Akashi-Kaikyo w Japonii. Zjawisko wystąpiło w masywnych płytach betonowych o grubości 1,5 m betonowanych jedna na drugiej w odstępach co około 2 tygodnie. Maksymalne zmierzone różnice temperatury wyniosły 20°C/m a za przyczynę powstania rys między warstwami betonu uznano wysoki gradient temperatury.

within 4 weeks at an air temperature of 25°C to 40°C. The maximum temperature measured in the concrete cross section was 37°C. As a result of technical problems at the construction site, the concreted blocks were flooded prematurely with river water, which had an average temperature of 10-11°C (low water temperature is due to the fact that it comes from the melting snow of the nearby Himalayas). The exact location of the maximum temperature measurement was not given, but assuming that it was in the middle of the height of the thickest block, it maybe evaluated that the gradient was at least: $(37 - 11)/(\frac{1}{2} \times 3) = \sim 17.5$°C/m. However, if equally high temperature was measured in the cross section of a lower block (1 m or 2 m), then the gradient could be as high as $(37 - 11)/(\frac{1}{2} \times 2) = 26$°C/m, or even $(37 - 11)/(\frac{1}{2} \times 1) = 52$°C/m. Consequently, due to thermal shock, the blocks cracked and the cracks ran through their entire height.

Nasu in his publication [23] discusses the case of cracking of the foundations of the Akashi-Kaikyo Bridge in Japan. The phenomenon occurred in massive 1.5 m thick concrete slabs, concreted one on top of the other, with pauses of approx. 2 weeks. Maximum temperature differences of 20°C/m were measured, and the significant temperature gradient was determined as the reason for the cracks found between the concrete layers.

Cusson and Repette [24] describe thermal cracks of the elements of a bridge in Canada. Barriers that cracked were not particularly massive; their length was 34 m, height – about 0.9 m, and width (at the base) about 0.9 m. During the first day after concreting, the barriers were not evenly insulated on either side. The base was placed on top of the "old concrete", the upper surface of the barrier was covered with wet burlap, while the vertical surfaces were covered with a mold – at the traffic-exposed face it was made of metal and at the back it was made of thick plywood with significant thermal insulation properties. The air temperature was slightly above 0°C.This created conditions for varied heat dissipation to the environment, causing a temperature difference of about 18°C between the core and the less insulated front surface before demolding (24 hours from concreting). As a result, shortly after removal of the formwork the concrete cracked perpendicularly to barrier length, at regular intervals of approx. 1 m.

Sang Hwa Jung, Young Cheol Choi and Seongcheol Choi [6] noted that reducing the heat of hydration of concrete in a massive block due to the use of ternary binders led to a decrease in the temperature gradient despite adverse concreting conditions (ambient temperatures above 0°C) and significantly reduced the effect of thermal cracking.

Cusson i Repette [24] opisali rysy termiczne elementów mostu w Kanadzie. Zarysowania wystąpiły w barierach mostowych, których przy długości 34 m, wysokości 0.9 m i szerokości około 0,9 m (u podstawy) nie można uznać za konstrukcje szczególnie masywne. Podczas pierwszego dnia betonowania bariery były zaizolowane równo z obu stron. Podstawa była ustawiona na powierzchni istniejącego „starego" betonu, górna powierzchnia była przykryta mokrą tkaniną jutową a powierzchnie pionowe przylegały do powierzchni szalunków - metalowych od strony ruchu oraz z grubej sklejki o istotnych właściwościach izolacyjnych od strony zewnętrznej. Temperatura powietrza wynosiła nieco powyżej 0°C. Powstały w ten sposób warunki nierównomiernego oddawania ciepła do otoczenia, skutkujące różnicą temperatury na poziomie około 18°C między rdzeniem elementu a słabiej izolowaną powierzchnią pionową od strony wewnętrznej przed rozdeskowaniem (24 godz. po zabetonowaniu). Doprowadziło to do powstania wkrótce po rozdeskowaniu zarysowań biegnących prostopadle do długości bariery w rozstawie co około 1 m.

Sang Hwa Jung, Young Cheol Choi i Seongcheol Choi [6] zauważyli, że zmniejszenie ciepła hydratacji betonu w masywnych blokach dzięki zastosowaniu spoiw trójskładnikowych przyniosło spadek gradientu temperatury pomimo niekorzystnych warunków podczas betonowania (temperatury otoczenia nieznacznie powyżej 0°C) oraz znacząco ograniczyło powstawanie rys termicznych.

Większość z cytowanych publikacji wskazuje również na trudności w diagnozowaniu przyczyn powstawania pękań podczas wykonywania konstrukcji betonowych [21]. W szczególności, często szok termiczny nie jest intuicyjnie oczywistą główną przyczyną zarysowań i diagnostyka tego rodzaju przypadków wymaga ciągłych pomiarów temperatury w trakcie twardnienia betonu lub numerycznego modelowania zmian temperatury w powiązaniu ze złożonymi obliczeniami i symulacjami.

5. PRZYPADEK MASYWNEGO FUNDAMENTU PODPORY MOSTU

5.1. PRZEDMIOT ANALIZY

W analizie skupiono się na elementach (oczepach) trzech bloków fundamentowych podpór mostu (w dalszej części pracy oznaczonych jako P23, P24 i P25), usytuowanych w nurcie rzeki (Rys. 2) o minimalnym wymiarze około 2,5 m oraz współczynniku masywności (P/V, gdzie P – całkowita powierzchnia oczepu w m^2, a V – objętość oczepu w m^3) wynoszącym około 1.0 m^{-1}. W świetle zacytowanych powyższych definicji i uwarunkowań elementy te uznać można za

Most of the cited publications also indicate that the diagnosis of the causes of concrete structure cracking during construction is challenging [21]. In particular, often thermal shock is not intuitively obvious as the main cause of cracking, and the diagnosis of such cases requires continuous temperature measurements in the hardening concrete or numerical modeling of temperature changes combined with complex calculations and simulations.

5. THE CASE OF THE MASSIVE BRIDGE SUPPORT FOUNDATION

5.1. THE SUBJECT OF THE ANALYSIS

The analysis focused on elements (caps) of three foundation blocks of bridge supports (symbols P23, P24 and P25 will be used in the paper) located in the river current (Fig. 2), whose minimum dimension was approx. 2.5 m, and the massiveness factor (P/V, where P – total cap surface area in m^2 and V – cap volume in m^3) was approx. 1.0 m^{-1}. Therefore, in the light of the definitions and considerations cited above, these elements can be considered massive. Caps with dimensions of approx. 2.5 m × 10 m × 30 m were concreted in winter conditions (freezing conditions), with sheet piling used as permanent formwork (preventing river water from flooding the caps).

Several hours after concreting the upper surfaces of the elements were protected with approx. 20-cm-thick sheets of polystyrene foam, as a form of thermal curing measures due to the low air temperature. Approximately 2-3 weeks after concreting, polystyrene foam sheets were removed from P24 and P25 elements, despite the air temperature below 0°C (Fig. 3: -7°C to 0°C). The existence of cracks on the upper surfaces of the elements was discovered during the first 24 hours after the removal of the polystyrene sheets. However, it cannot be ruled out that the formation of cracks had been initiated earlier, as the concrete surfaces covered with polystyrene were not visible and when the polystyrene was removed, the employees did not inspect the concrete surface closely. An additional factor was the fact that the concrete surface was dry, which impedes visual detection of cracks. In the case of support P23, the removal of polystyrene insulation occurred one week after concreting, in an uncontrolled manner, i.e. the sheets were removed by the passing flood wave of the river. In this case, cracks were also observed within one day of removal of the polystyrene. The analyzed massive elements were cracked on the upper surface. The direction of the cracks was parallel to the shorter side of the block (Fig. 4). In the course of the research (core drilling), it was

masywne. Oczepy o wymiarach około 2.5 m × 10 m × 30 m betonowano w warunkach zimowych (w ujemnych temperaturach) z wykorzystaniem ścianki szczelnej jako deskowania traconego (zapobiegającego zalaniu oczepów przez nurt rzeki).

noted that most of the cracks ran through the entire height of the element, and their width was exceeded 1.5 mm at times.

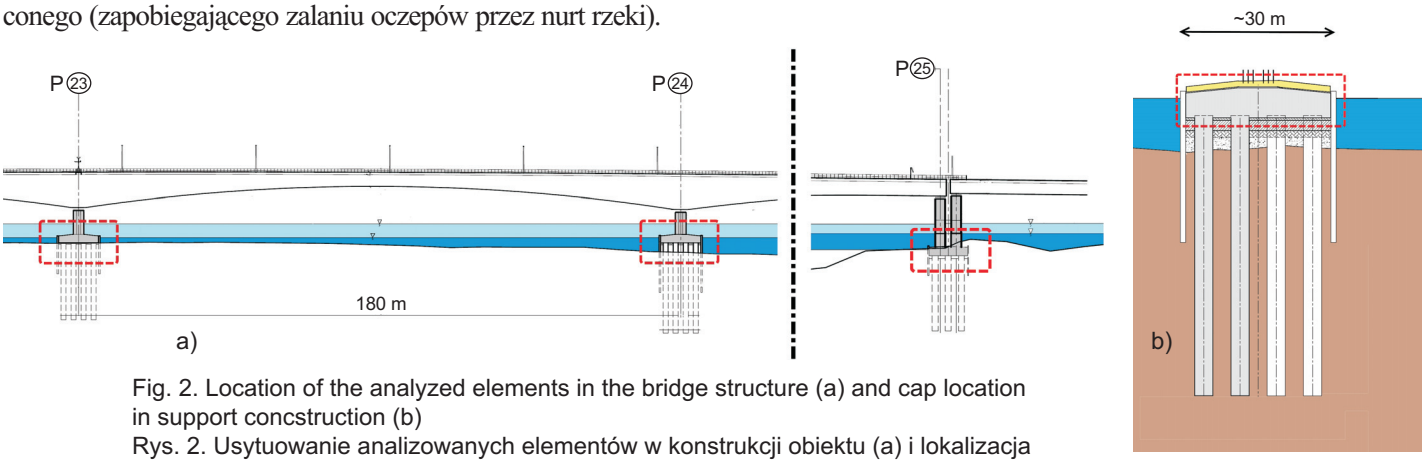

Fig. 2. Location of the analyzed elements in the bridge structure (a) and cap location in support concstruction (b)
Rys. 2. Usytuowanie analizowanych elementów w konstrukcji obiektu (a) i lokalizacja oczepu w konstrukcji podpory (b)

Kilka godzin po betonowaniu górne powierzchnie elementów zabezpieczono płytami styropianowymi o grubości około 20 cm w celu zapewnienia odpowiednich warunków termicznych podczas dojrzewania betonu w warunkach niskiej temperatury otoczenia. Po około 2-3 tygodniach od betonowania pomimo ujemnej temperatury otoczenia (Rys. 3: -7°C do 0°C) z elementów P24 i P25 zdjęto płyty styropianowe. Obecność spękań na górnych powierzchniach elementów stwierdzono w ciągu pierwszych 24 godzin po zdjęciu izolacji. Ze względu na zakrycie powierzchni betonowych płytami styropianowymi nie można jednak wykluczyć wcześniejszej inicjacji zarysowań, które mogły zostać niezauważone ze względu na brak szczegółowych oględzin bezpośrednio po zdjęciu styropianu. Suchość powierzchni betonu dodatkowo utrudniła zauważenie zarysowań. W przypadku podpory P23 izolacja została usunięta już tydzień po betonowaniu, w sposób niekontrolowany tj. przez przechodzącą pod mostem falę wezbraniową. Również w tym przypadku zarysowania zauważono w ciągu doby po odsłonięciu powierzchni betonu. W analizowanych elementach masywnych wystąpiły zarysowania na górnej powierzchni. Rysy biegły równolegle do krótszego boku betonowego bloku (Rys. 4). W trakcie badań (odwiertów rdzeniowych) stwierdzono, że większość rys biegnie przez całą wysokość elementu miejscami osiągając rozwartość 1,5 mm.

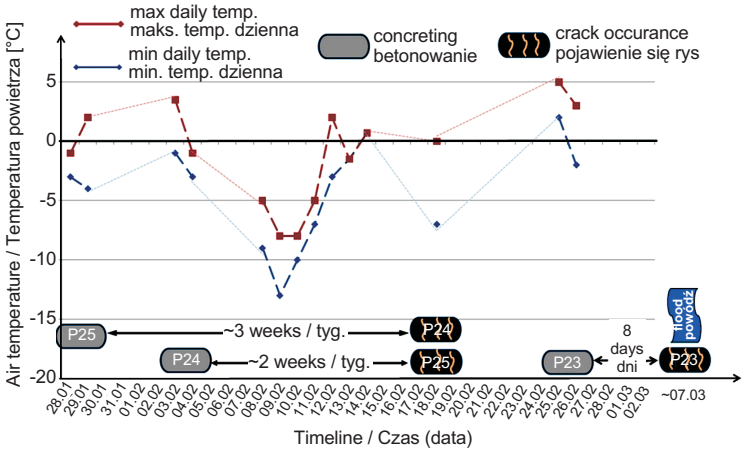

Fig. 3. History of concreting and cracking of the analyzed elements P23, P24 and P25
Rys. 3. Przebieg betonowania i powstawania zarysowań w elementach P23, P24 i P25

5.2. ANALIZA POTENCJALNYCH PRZYCZYN ZARYSOWAŃ

Niska temperatura otoczenia w trakcie twardnienia betonu i masywność analizowanych elementów wskazały na zasadność uwzględnienia szoku termicznego jako jednej z możliwych przyczyn powstania rys. W celu uzyskania całościowego

5.2. ANALYSIS OF THE POTENTIAL CAUSES OF CRACKING

The low ambient temperature during the hardening of concrete and the massiveness of the analyzed elements prompted consideration of the phenomenon of thermal shock as one of the possible causes of cracks. In order to establish a complete picture of the situation, other potential causes of cracking, previously indicated in Table 1, were also analyzed.

When analyzing the "life history" of concrete, the earliest phenomena that can cause cracks are the settling of the concrete mix and its plastic shrinkage. In the analyzed

obrazu sytuacji w analizie uwzględniono również inne możliwe przyczyny zarysowań, które zostały podane w Tabl. 1.

Rozpatrując cały cykl życia betonu, najwcześniejszymi zjawiskami, które mogą spowodować powstanie zarysowań są osiadanie oraz skurcz plastyczny mieszanki. Zjawiska te należy jednak wykluczyć w analizowanej sytuacji ponieważ przebieg rys nie odzwierciedla przebiegu górnej warstwy zbrojenia, jak to powinno mieć miejsce w przypadku rys wywołanych osiadaniem mieszanki. Skurcz plastyczny, który spowalnia w niskich wartościach temperatury, nie miał możliwości rozwinięcia się przed zakryciem oczepów styropianem.

Bezpośrednio po betonowaniu mogło dojść do powierzchniowego zamarznięcia betonu, gdyż zakrycie powierzchni styropianem nie było możliwe dopóki nie można było na nią wejść, czyli najwcześniej po kilku godzinach. Charakter spękań nie wskazuje jednak na uszkodzenia mrozowe a ochronę przed nagłym ochłodzeniem zapewniła relatywnie wysoka temperatura mieszanki w trakcie betonowania (zgodnie z dokumentami dostawy betonu 10-15°C). Daje to podstawy do odrzucenia hipotezy o znaczącym wpływie niskiej temperatury na powstanie zarysowań.

W analizowanym przypadku elementy betonowano warstwami (o grubości 50 cm) z przerwami co 4 godziny, co może wskazywać na skurcz podczas wiązania jako możliwą przyczynę powstania rys. Zwrócić należy uwagę, że zarysowania powstałe w wyniku skurczu podczas wiązania tworzą zazwyczaj nieregularny wzór na całej powierzchni elementu, a poza tym naprężenia skurczowe powinny były zostać w znacznym stopniu przeniesione przez zbrojenie przeciwskurczowe. Kierując się wymaganiami polskiej normy dotyczącej obiektów mostowych PN-S 10042 [25] ustalono, że ilość zbrojenia górą (pręty ϕ20 w rozstawie co 250 mm) jest dwukrotnie większa od minimalnej wymaganej ilości zbrojenia przeciwskurczowego (0,3% powierzchni przekroju betonu współpracującego ze zbrojeniem – zgodnie z wymaganiami [25]). Nie wyklucza to jednak możliwości powstania mikrorys pomiędzy warstwami o grubości 50 cm w elemencie masywnym wskutek nierównomiernego skurczu podczas wiązania. Biorąc to pod uwagę można założyć, że skurcz podczas wiązania mógł mieć udział w powstawaniu naprężeń, które przyczyniły się do zarysowania elementów lub dalszej propagacji rys, które zostały zainicjowane przez inny mechanizm.

W rozpatrywanym przypadku należy a priori wykluczyć odkształcenia deskowania jako możliwą przyczynę zarysowań. Wynika to z relatywnie dużej sztywności ścianki szczelnej, która pełniła rolę deskowania powierzchni bocznych oczepów oraz niskiego prawdopodobieństwa znaczącego odkształcania

situation, however, these phenomena should be excluded, as the cracks did not form a pattern reflecting the arrangement of upper reinforcement, which is characteristic of mix settlement. The plastic shrinkage, which decelerates at low temperatures, did not have time to develop before the caps were covered with polystyrene.

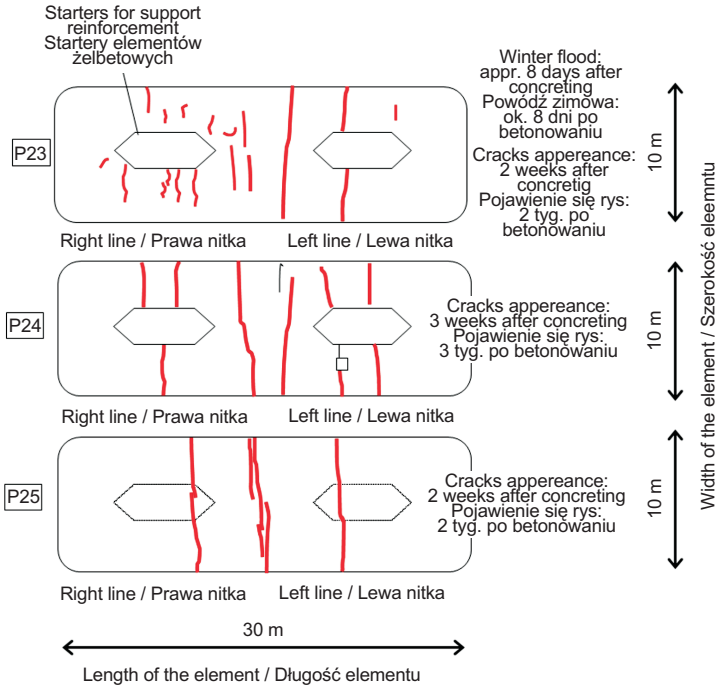

Fig. 4. The orientation of cracks on the surfaces of the analyzed massive concrete elements
Rys. 4. Kierunek przebiegu rys na powierzchniach analizowanych elementów z betonu masywnego

Immediately after concreting, surface freezing could have taken place, because covering of the surface of the element with foamed polystyrene was only possible when workers were able to walk over the concrete surface, i.e. after a few hours. The nature of the cracks, however, does not correspond to frost damage, and the relatively high temperature of the mix during concreting (from 10°C to 15°C according to delivery documents) protected it against rapid freezing. Thus, the hypothesis about significant contribution of frost phenomena to concrete cracking can be rejected.

In the analyzed case, the elements were concreted in layers (50 cm) with pauses every 4 hours, which makes setting shrinkage a possible cause of crack formation. The pattern of setting shrinkage cracks, however, is usually irregular over the entire surface of the element, and the stress from shrinkage should have been significantly absorbed by the anti-shrinkage reinforcement. Based on the standards used

deskowania podczas zabudowywania mieszanki. Potwierdzeniem słuszności tego wniosku jest brak odkształceń ściany na późniejszym etapie.

Skurcz spowodowany wysychaniem mógł wystąpić wyłącznie po zdjęciu płyt styropianowych, przy czym odnotowane warunki otoczenia wykluczają jego szybkie narastanie. Można go uznać jedynie za jeden z mechanizmów intensyfikujących rozwój zarysowań w pierwszych kilku tygodniach po zdjęciu termoizolacji, który mógł spowodować wydłużenie zasięgu rys na całą wysokość elementu.

Pozostałych zjawisk i procesów, które mogłyby potencjalnie doprowadzić do powstania zarysowań, takich jak korozja chemiczna, koncentracja naprężeń od obciążeń użytkowych, cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, itd. nie można uznać za odpowiedzialne za powstanie zarysowań oczepów ze względu na krótki czas, jaki upłynął od zabudowania mieszanki do wystąpienia zjawiska.

Wykluczenie decydującej roli wyszczególnionych powyżej czynników potwierdza słuszność przypuszczenia, że podstawową przyczyną powstania zarysowań był szok termiczny związany z ciepłem hydratacji w elemencie masywnym oraz niską temperaturą otoczenia. Pomiary temperatury przeprowadzone na powierzchni betonu bezpośrednio po zdjęciu płyt styropianowych dały wartości sięgające 26°C w obszarze przypadającym w połowie szerokości elementu. Temperatura powietrza sięgała maksymalnie 0°C w ciągu dnia by w nocy spaść do minimalnego poziomu -7°C. Przy tych wartościach różnica między temperaturą powierzchni a temperaturą otoczenia sięgnęła 26°C w ciągu dnia i 33°C w ciągu nocy.

5.3. SYMULACJE NUMERYCZNE ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ WYWOŁANYCH ODDZIAŁYWANIEM TEMPERATURY

Mieszanki miały następujący skład i parametry istotne z punktu widzenia analizy powstawania zarysowań termicznych [26]: cement CEM III/A 42.5N LH o wartości ciepła hydratacji wyznaczonej metodą semi-adiabatyczną wynoszącej 246 J/g; brak domieszek regulujących szybkość wiązania; klasa wytrzymałości C30/37. Mieszanka charakteryzowała się konsystencją S3 wyznaczoną metodą stożka opadowego (opad stożka 100-150 mm zgodnie z normą PN-EN 206). Zawartość cementu w 1 m^3 mieszanki wynosiła 340 kg przy stosunku wodno-cementowym *w/c* na poziomie 0,45. Temperatura mieszanki w trakcie zabudowywania wynosiła 10-15°C. Warunki temperaturowe w trakcie wiązania i twardnienia przedstawiono na Rys. 3. Wszystkie powyższe informacje umożliwiły modelowanie przebiegu zmian temperatury oraz rozkładu naprężeń w wybranych strefach masywnego elementu betonowego przy wykorzystaniu programu FE-tool

in Poland for bridge structures, PN-S 10042 [25], it was determined that the cross section of the upper reinforcement of the element (ϕ20 bar every 250 mm) was twice as large as the minimum required due to shrinkage (0.3% of the area of concrete in the section zone cooperating with reinforcement – according to [25]). However, this does not necessarily mean that uneven setting shrinkage did not cause micro-cracks between the 50-cm-thick concrete layers in the mass element. It can therefore be assumed that setting shrinkage may have been a component of stresses that contributed to cracking of the elements or further propagation of cracks initiated by another mechanism.

Formwork deformation is a reason for cracking which should be practically excluded a priori in the discussed case. The steel sheet piling, acting as the side formwork for caps, has relatively high rigidity and the probability of its significant deformation during concreting should be considered as low. This conclusion is supported by the fact that no wall deformations were reported later.

Drying shrinkage may have only occurred after removal of the polystyrene sheets and could not have developed quickly in the documented environmental conditions. It can be only considered as one of the mechanisms intensifying the development of cracks within a few weeks after removal of the thermal insulation, i.e. it might have increased the range of cracks over the entire height of the element.

Other phenomena and processes that could have resulted in cracking, such as chemical corrosion, stress concentrations from service loads, cyclic frost phenomena, etc., cannot be recognized as the cause of the cracks observed in the caps, due to the short time that passed between concreting and the occurrence of the phenomenon.

Exclusion of the decisive role of the reasons considered above confirmed the authors' supposition that the main reason for cracking in the analyzed case was the occurrence of thermal shock associated with heat of hydration in the massive element and low ambient temperature. Temperature measurements performed on the surface of concrete immediately before removal of the polystyrene showed values of up to 26°C in the central zone of the width of the element. The air temperature reached a maximum of 0°C during the day and a minimum of -7°C at night. This gave a maximum surface temperature difference of 26°C during the day and up to 33°C at night.

ConTeSt Pro R&D, wersja 3.2 [27]. W modelowaniu przyjęto następujące standardowe parametry wyjściowe: α_c – współczynnik przejmowania ciepła, θ_m – temperatura powierzchni elementu, $\varepsilon_m = 0{,}8$ – współczynnik emisyjności powierzchni betonu, $\varepsilon_f = 1{,}0$ – całkowity współczynnik emisyjności.

Rys. 5 przedstawia przebieg zmian temperatury w trzech wybranych, osobnych obszarach na przykładowej podporze (zielony – na górnej powierzchni elementu, niebieski – w strefie środkowej i czerwony – na spodzie elementu). Wykres temperatury rozpoczyna się z końcem betonowania i obejmuje moment zdjęcia płyt styropianowych zastosowanych do pielęgnacji termicznej betonu (godz. 336 na osi odciętych), dobę po zdjęciu izolacji (godz. 360 na osi odciętych) i późniejszy okres do godz. 700. Bezpośrednio po zdjęciu termoizolacji temperatura na górnej powierzchni elementu w ciągu 24 godz. spadła z 45°C do 12°C. Oznacza to, że w ciągu około doby różnica temperatury między rdzeniem elementu masywnego a punktem znajdującym się tuż pod powierzchnią elementu sięgnęła ponad 30°C. W wyniku analizy charakteru wykresów temperaturowych (Rys. 5) stwierdzić można, że w założonych warunkach szybkość stygnięcia rdzenia w tym okresie była w przybliżeniu stała i wynosiła 0,07-0,08°C/h, tj. była około 15 razy niższa od szybkości stygnięcia strefy powierzchniowej, która wynosiła nieco powyżej 1°C/h. Znając wysokość elementu (około 2,5 m) oraz wiedząc, że w ciągu doby po zdjęciu termoizolacji górna powierzchnia elementu była poddana oddziaływaniu różnicy temperatury na poziomie przynajmniej 30°C (zgodnie z Rys. 5: $\Delta T = 43 - 12 = 31$°C), obliczyć możemy gradient temperatury (różnicę temperatury na 1 m wysokości elementu), który w tym przypadku wyniósł 30°C/1,25 m = 24°C/m. Przy wyznaczonej szybkości stygnięcia, gradient spadł poniżej podanego w literaturze maksymalnego dopuszczalnego poziomu (tj. 20°C) przynajmniej 60 godzin po zdjęciu termoizolacji. Oznacza to, że młody beton był przez okres przynajmniej 3 dni po zakończeniu pielęgnacji wystawiony na naprężenia na poziomie powodującym przeciążenia.

Symulacja rozkładu naprężeń na grubości elementu w strefie środkowej (z uwzględnieniem ograniczenia swobody odkształceń przez pale fundamentowe i betonowy fundament) wywołanych zmianami temperatury w czasie do 6 miesięcy po usunięciu termoizolacji wykazała istotne zmiany stanu naprężeń w miarę upływu czasu (Rys. 6). Porównanie zmian rozkładu naprężeń w miarę wzrostu wytrzymałości betonu w czasie umożliwiło opracowanie modeli przedstawionych na Rys. 6. Niebezpiecznie wysoka wartość stosunku obliczonych naprężeń rozciągających do wytrzymałości na rozciąganie betonu w górnej części elementu (kształtująca się na poziomie

5.3. NUMERICAL SIMULATIONS OF STRESS DISTRIBUTION DUE TO TEMPERATURE ACTION

Concrete composition and characteristics which constitute substantial factors in thermal cracking analyses [26] were as follows: CEMIII/A 42.5N LH cement with heat of hydration value determined using the semi-adiabatic method equal to 246 J/g; no admixtures for setting regulation; compressive strength class C30/37. The consistency of the concrete mix according to the slump testing method was determined as S3 (range between 100 mm and 150 mm of slump according to the PN-EN 206). The cement content in 1 m^3 was 340 kg, the water-cement ratio *w*/*c* equaled 0.45. Temperature of the mix during concreting was 10-15°C. Thermal conditions during setting and hardening are presented in Fig. 3. All the above information enables modeling of the course of temperature changes and stress distribution in the selected areas of the mass concrete element using the program FE-tool ConTeSt Pro R&D ver. 3.2 [27]. The standard initial parameters for modeling were used: α_c – coefficient of heat transfer, θ_m – temperature of the surface of the element, $\varepsilon_m = 0.8$ – concrete surface emissivity, $\varepsilon_f = 1.0$ – overall emissivity.

Fig. 5 presents the course of temperature changes in three selected distinct locations in the exemplary support (green – on the top of the element, blue – in the middle zone, and red – on the bottom of the element). The temperature chart starts at the end of concreting and covers the moments of removal of the polystyrene used for concrete surface thermal curing (336 hours on the horizontal axis), a day after insulation removal (360 h on the axis) and beyond, up to 700 hours. Immediately after insulation removal the temperature on the top surface of the element decreases from 45°C to 12°C during 24 hours. Thus, within about 1 day, the temperature difference between the core of the massive element and the point located just below its surface reached over 30°C. Upon analysis of the nature of the temperature charts (Fig. 5), it can be stated that under the assumed conditions, the cooling rate of the core of the element during this period was approximately constant and equaled 0.07-0.08°C/h, i.e. it was about 15 times lower than the cooling rate of the surface zone, which was just over 1°C/h. Considering the height of the element (approx. 2.5 m) and the fact that within one day after removal of the thermal insulation the upper part of the element was loaded with a temperature difference of at least 30°C (according to Fig. 5: $\Delta T = 43 - 12 = 31$°C), one can calculate a temperature gradient (difference per 1 m of element height) as high as 30°C/1.25 m = 24°C/m. At the set

powyżej 0,8 i okresowo wzrastająca do 1) utrzymywała się przez kilka dni po zdjęciu termoizolacji (kolor ciemnoczerwony na powierzchni elementu na Rys. 6 na obrazach stanu naprężeń w dniach 15 i 21). Wartość tego ilorazu równa 1 świadczy o zrównaniu się wartości wytrzymałości i naprężenia tj. o osiągnięciu momentu zarysowania, choć w praktyce, ze względu na niepewność oszacowania, jako wartość krytyczną przyjmuje się 0,8. W okresie do około 1 mies. po zdjęciu izolacji ze styropianu (stany naprężeń w dniach 28 i 42 na Rys. 6) strefa rozciągana sięgnęła głębiej w głąb elementu (białe strzałki na Rys. 6), a strefa ściskana pojawiła się na górnej powierzchni elementu dopiero 42 dni po zdjęciu płyt styropianowych (różowe strzałki).

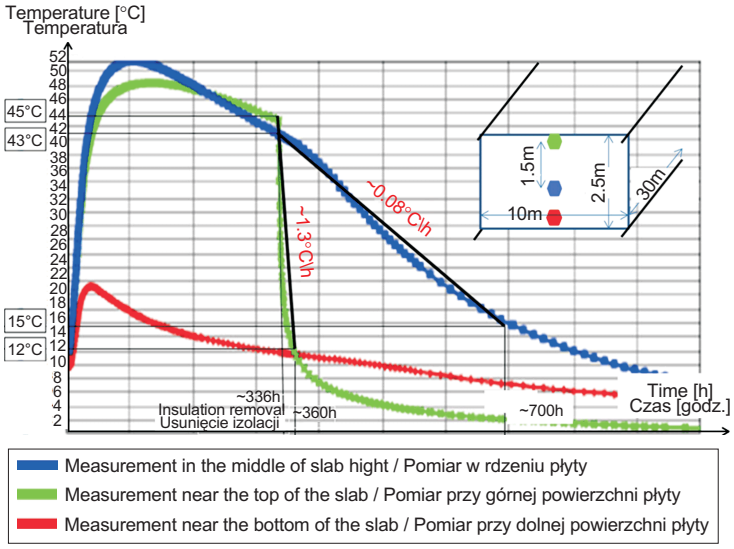

Fig. 5. Estimation of the temperature gradient after removal of thermal insulation from the element – an example for the P24 element

Rys. 5. Oszacowanie gradientu temperatury po zdjęciu termoizolacji – na przykładzie elementu P24

Rozkład naprężeń na wysokości elementu po 28 dniach twardnienia (Rys. 6) mógł spowodować propagację spękań z górnej powierzchni w dół elementu. W tym samym czasie odnotować można było zmniejszenie rozwarcia rys w strefie ściskanej przy powierzchni elementu. W okresie po upływie 1 miesiąca od momentu zdjęcia izolacji ze styropianu zasięg strefy rozciąganej nie zwiększył się (białe strzałki na ostatnich trzech rysunkach stanów naprężeń na Rys. 6), co może wskazywać, że po 42 dniach nie dochodziło do pogłębienia rys (w kierunku dołu elementu) wskutek oddziaływania naprężeń termicznych. Jednocześnie, wydaje się, że skurcz spowodowany wysychaniem oraz skurcz autogeniczny mógł odegrać ważną rolę w propagacji rys w tym okresie, co może wyjaśniać wystąpienie mikrorys w dolnej części rdzeni wyciętych z elementu. Podobną analizę przeprowadzono dla pozostałych zarysowań

cooling rate, this gradient decreased below the level indicated in the literature as the maximum allowable (i.e. 20°C) at least 60 hours after removal of the insulation. This means that the young concrete in the period of minimum 3 days after the end of curing was subjected to stress, causing its overloading.

Simulation of stress distribution over the thickness of the element in its middle zone (taking into account the restriction of freedom of deformation by foundation piles and concrete foundation), resulting from temperature changes occurring up to six months after removal of the insulation, showed significant changes in the state of stress over time (Fig. 6). Comparison of changes in stress distribution over time with the development of concrete strength over time enabled development of the models shown in Fig.6. The dangerously high (above 0.8 and, periodically, even equal to 1) ratio of the calculated tensile stress to the tensile strength of the concrete in the upper zone of the element, persisted for a few days after removal of the thermal insulation (dark red color at the surface of the element in Fig. 6 in the images showing the stress state on day 15 and day 21). The value of this ratio equal to 1 reflects equalization of strength and stress, i.e. the moment of crack formation, but in practice the value of the ratio equal to 0.8 is considered a critical condition, due to the uncertainty of estimation. In the period of up to about 1 month after removal of the polystyrene insulation (stress states on days 28 and 42 in Fig. 6), the range of the tension zone increased, propagating deeper into the element (white arrows in Fig. 6), and a compression zone appeared on the top of the element as late as 42 days after the polystyrene sheets were removed (pink arrows).

The stress distribution along the height of the element, developed after the 28 th day of hardening (Fig. 6), might cause crack propagation from the top surface of the element downward. At the same time reduction in crack width in the compressed zone close to the surface might be observed. In the period beyond 1 month after the insulation was removed, the range of the tension zone did not increase (white arrows in the last three stress state images Fig.6), which may indicate that after day 42 the cracks have not deepened further (i.e. to the bottom of the element) due to the thermal stresses. However, it seems that the drying and autogenic shrinkage might have played an important role in crack propagation in this period, which would explain the micro-cracks found in the lower section of the core specimens taken from the element. A similar analysis was carried out for the remaining cracked caps in which, within 1 day after insulation removal,

oczepów, w przypadku których w ciągu doby po zdjęciu izolacji w górnej strefie powstały duże naprężenia rozciągające (obrazy stanu naprężeń oczepów P24 i P25 były porównywalne).

significant tensile stresses developed in the upper zone (stress state images for caps P24 and P25 were comparable).

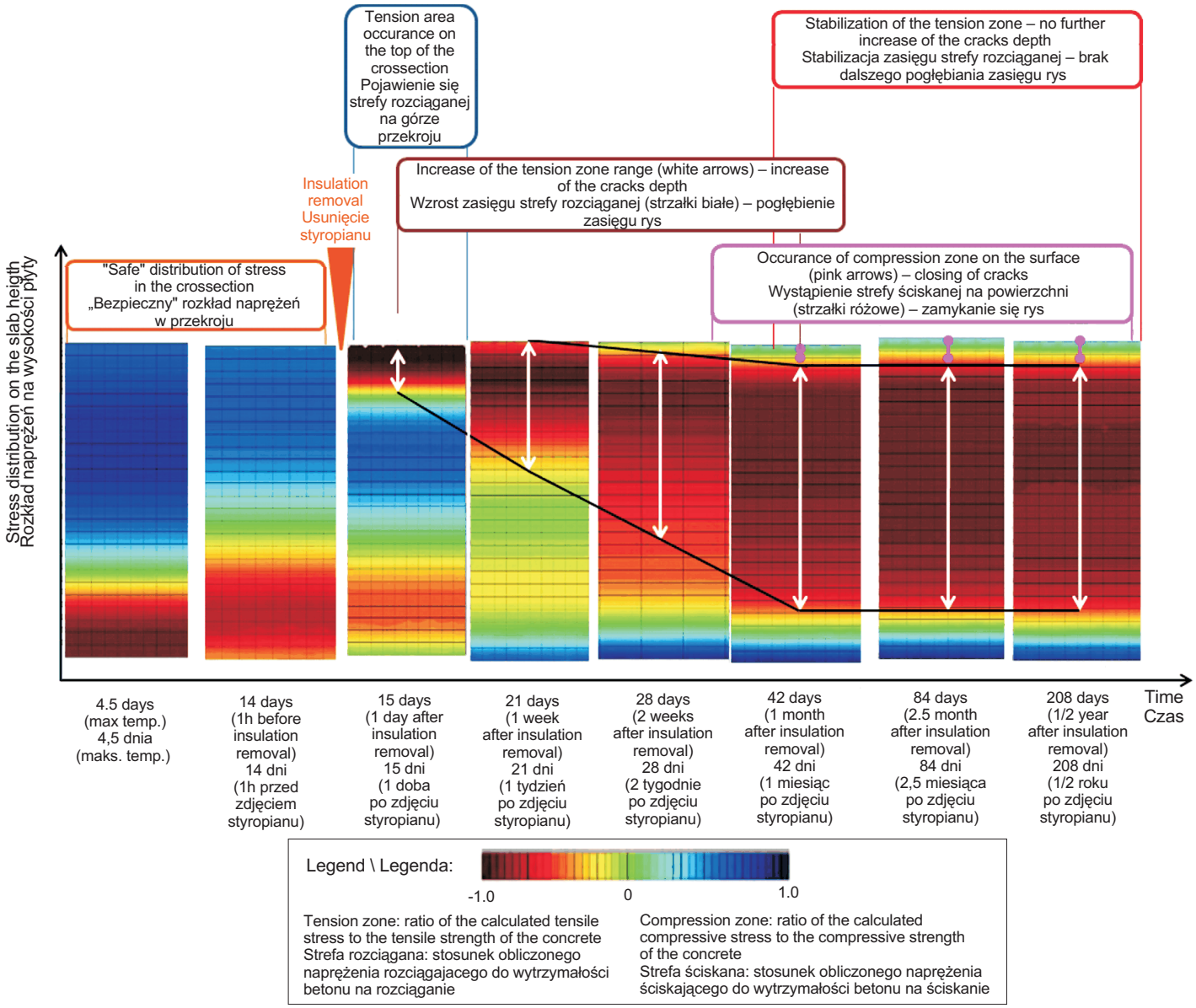

Fig. 6. Changes in stress distribution along theelement height over the period of 4.5 days to 208 days after concreting – analysis for the P24 cap

Rys. 6. Zmiany w rozkładzie naprężeń na wysokości elementu w okresie od 4,5 do 208 dni po zabudowaniu mieszanki – analiza dotyczy oczepu P24

5.4. DYSKUSJA

Przeprowadzona analiza (Tabl. 2) potwierdziła przypuszczenia autorów, że przyczyną powstania zarysowań był szok termiczny i wysoki gradient temperatury, podczas gdy zjawiska

5.4. DISCUSSION

The analysis (Table 2) confirmed the authors' suppositions that the origin of the cracks was thermal shock and high temperature gradient, while the contraction-shrink-

skurczowe mogły się przyczynić do zwiększenia ich intensywności.

age phenomena might have further intensified the cracking.

Table 2. Analysis of the significance of potential causes of cracking of the analyzed caps
Tablica 2. Analiza znaczenia potencjalnych przyczyn zarysowań analizowanych oczepów

Phase of concrete life Etap cyklu życia betonu	Phenomenon resulting in cracking Zjawisko powodujące zarysowanie	Assessment of the phenomenon as a possible cause of analyzed caps cracking Ocena prawdopodobieństwa spowodowania zarysowań analizowanych oczepów
Concrete after compaction, before the final setting Mieszanka betonowa po zagęszczeniu i przed końcem wiązania	Mix settlement Osiadanie mieszanki	Improbable – there is no information about occurrence of cracks before the surface was covered with insulation; settlement cracks would have reflected the reinforcement pattern Zerowe – brak jest informacji o wystąpieniu spękań przed zakryciem powierzchni izolacją; rysy wskutek osiadania biegną zgodnie z przebiegiem zbrojenia
	Plastic shrinkage Skurcz plastyczny	Low probability – early covering of concrete prevents drying; drying is slower in winter Niskie – wczesne zakrycie betonu zapobiega wysychaniu; wysychanie przebiega wolniej zimą
	Setting shrinkage Skurcz podczas wiązania	Probable – especially given that concreting in layers every 4 hours causes differences in the temperature of the mix – this promotes transfer of moisture between the layers and uneven shrinkage; however, the observed regular pattern of cracks is unusual for the phenomenon Pośrednie – szczególnie w sytuacji wystąpienia różnicy temperatur mieszanki wywołanej betonowaniem warstwami co 4 godz. – taka sytuacja sprzyja przechodzeniu wilgoci między warstwami i nierównemu skurczowi; zwrócić należy jednak uwagę, że zaobserwowany regularny przebieg spękań nie jest typowy dla tego zjawiska
	Early surface freezing Wczesne zamarznięcie powierzchni	Low probability – temperature was below 0°C during and after concreting, but the nature of the cracks is different than typically observed after early freezing Niskie – choć zarówno w trakcie jak i po zabudowaniu mieszanki panowała ujemna temperatura to jednak charakter spękań nie wskazuje na spękania typowo występujące po wczesnym zamarznięciu betonu
Young concrete with low but measurable strength Młody beton o niskiej ale mierzalnej wytrzymałości	Thermal shock Szok termiczny	High probability – rapid cooling occurred after removal of the polystyrene – in P24, for example, within 1 day of removal of the insulation a temperature gradient of approx. 24°C/m (30°C difference in temperature in crosssection) developed; the regular pattern of cracks is typical for this phenomenon; uneven cooling due to insulation discontinuities and protruding reinforcement might have also occurred during hardening Wysokie – po zdjęciu izolacji styropianowej nastąpiło gwałtowne ochłodzenie, np. w przypadku P25 w ciągu doby po zdjęciu izolacji doszło do wytworzenia gradientu temperatury na poziomie ok. 24°C/m (różnica temperatury 30°C na długości przekroju); regularny przebieg rys jest typowy dla tego zjawiska; w trakcie twardnienia mogło również wystąpić nierównomierne chłodzenie spowodowane nieciągłością izolacji i wystającym zbrojeniem
	Formwork deformation Odkształcenie szalunków	Low probability – there areno reports about observed or measured formwork deformation Niskie – brak doniesień o zaobserwowanych lub zmierzonych odkształceń deskowania
Hardened concrete Stwardniały beton	Drying shrinkage Skurcz wywołany wysychaniem	Probable – time from removal of insulation to detection of cracks was short, so only small shrinkage was probable, which should have been transferred by the upper reinforcement; however, contribution of drying shrinkage tofurther deepening of cracks is possible Pośrednie – od usunięcia izolacji do wykrycia spękań upłynęło niewiele czasu, w którym mogły powstać jedynie nieznaczne spękania, które powinny były zostać przeniesione przez zbrojenie górą; tym niemniej możliwy jest udział skurczu wywołanego wysychaniem w pogłębianiu już istniejących rys
	Other long-term factors Inne oddziaływania długookresowe	Improbable – time period tocrack development was too short Zerowe – upłynął zbyt krótki czas na powstanie spękań

Zgodnie z prawem stygnięcia Newtona szybkość oddawania ciepła przez powierzchnię betonową jest funkcją różnicy temperatury tej powierzchni i temperatury otoczenia oraz współczynnika przewodzenia ciepła do otoczenia. Szybkość przepływu ciepła z wnętrza betonu na powierzchnię jest w analogiczny sposób uzależniona od gradientu temperatury i dodatkowo od współczynnika przewodzenia ciepła betonu. Współczynnik przewodzenia ciepła betonu zmienia się w czasie w wyniku zmian mikrostrukturalnych [28]. Jego wartość zależy również od wilgotności betonu a różnica wartości między betonem suchym i wilgotnym może sięgać nawet 30% [28]. Ze stałą wartością możemy mieć do czynienia w przypadku stwardniałego betonu i stabilnej wilgotności.

W świetle powyższych faktów rozważyć można zastosowanie dwóch wzajemnie niewykluczających się sposobów ograniczania naprężeń termicznych. Pierwszy z nich polega na ograniczeniu i zmianie sposobu przekazywania ciepła do otoczenia przez zastosowanie termoizolacji, układów zapewniających odprowadzenie ciepła z wnętrza masywnego elementu, itd. Drugi z tych sposobów polega na zmniejszeniu gradientu temperatury w obrębie samego elementu przez obniżenie ciepła hydratacji i szybkości jego uwalniania. Ograniczenie ilości ciepła uwalnianego z betonu wymaga podjęcia działań na etapie projektowania, obejmujących odpowiedni dobór składu materiałowego mieszanki (szczególnie celowe jest stosowanie niskokalorycznych cementów).

Wykorzystanie termoizolacji jest metodą o wiele prostszą pod względem technicznym i nie wymagającą uprzednich przygotowań, aczkolwiek w przypadku nieprawidłowego zastosowania nie popartego analizami obliczeniowymi może prowadzić do powstania problemów.

6. WNIOSKI

Ustalono, że podstawową przyczyną powstania rys w analizowanym elemencie był szok termiczny, podczas gdy skurcz przy wiązaniu i wysychaniu mógł zwiększyć intensywność zarysowania i pogłębić istniejące już rysy. Zjawiska termiczne związane z procesem hydratacji cementu są częstą przyczyną powstawania rys w młodym betonie elementów masywnych. Praktyczne doświadczenia autorów w zakresie ekspertyz budowlanych wskazują, że znaczenie tego mechanizmu jest często niedoszacowane i jest on pomijany na etapie projektowania oraz nie uwzględniany w technologii budowy. Sytuację tę pogarsza brak wystarczających wytycznych dotyczących ciepła hydratacji w europejskich normach dotyczących projektowania konstrukcji (Eurokodach), co w powiązaniu z szeroko rozpowszechnionym przeświadczeniem o niemożliwych do uniknięcia skutkach zjawisk termicznych w młodym betonie przekłada się na brak odpowiednich zapisów w specyfikacjach

According to Newton's law of cooling, the rate of heat dissipation from a concrete surface is a function of the difference in surface and ambient temperatures as well as the coefficient of thermal conductivity. The rate of heat flow from the depth of concrete to its surface is similarly related to the temperature gradient, but also to the thermal conductivity coefficient of concrete. The thermal conductivity coefficient changes in time due to changes of concrete microstructure [28]. It also depends on the level of moisture in concrete – the difference in this coefficient between dry and wet concrete can be as high as 30% [28]. For a fully hydrated concrete in stable moisture conditions it maybe constant.

Considering the above, two mutually non-exclusive ways of limiting thermal stress can be considered. The first is reducing and changing the manner of heat transfer to the environment, using thermal insulation, systems for removing heat from the interior of the massive element, etc. The other is limiting the temperature gradient in an element itself, by reducing the amount of heat of hydration and the rate of its release. Reducing the amount of heat released from concrete would require activities at the design stage, including the appropriate choice of material composition of concrete (application of low heat cements is especially desirable).

The use of thermal insulation is technically much simpler and possible to undertake ad hoc, but as the above analysis shows – it can also lead to problems in the case of improper use, not supported by prior computational analysis.

6. CONCLUSIONS

It was established that the key reason for the formation of cracks in the analyzed element was thermal shock, while the setting shrinkage and drying shrinkage may have additionally intensified the effect of cracking and deepened the cracks in the element. Thermal phenomena associated with cement hydration are a common reason for crack development in young concrete of massive elements. However, practical experience of the authors in expert construction evaluation indicates that this mechanism is often underestimated and overlooked in the design phase and construction technology. This situation is exacerbated by the fact that the Eurocodes for structure design do not provide sufficient regulations on the issue of hydration heat, which accompanied by a widespread conviction about the inevitability of adverse effects of thermal phenomena in young concrete, translates into lack of satisfactory provisions in this respect in technical specifications. At the stage of the design itself, adequate technological conditions should be designed and

technicznych. W celu ograniczenia do bezpiecznego poziomu wpływu zjawisk termicznych w młodym betonie należy przewidzieć i określić odpowiednie warunki technologiczne. Podstawowym elementem powinno być ograniczenie całkowitej ilości ciepła uwalnianego przez element z betonu masywnego przez odpowiedni dobór jakościowy i ilościowy składników mieszanki, w tym cementu. Szczególne korzyści przynosi stosowanie cementów niskokalorycznych o obniżonym cieple hydratacji, w tym cementów o większej zawartości belitu, żużla wielopiecowego lub popiołu lotnego. Równie ważne jest dobranie i zastosowanie odpowiedniej technologii pielęgnacji betonu, która zapewni odprowadzenie ciepła z elementu masywnego, ograniczając w ten sposób gradient temperatury. Uwzględnienie tych warunków na wczesnym etapie realizacji inwestycji budowlanej znacząco zmniejszy ryzyko uszkodzeń termicznych młodego betonu, zmniejszenia trwałości i konieczności przeprowadzenia kosztownych napraw.

Celem opisanej w artykule analizy było przedstawienie zasad postępowania na bazie stworzonej przez Fowlera koncepcji śledztwa inżynierskiego [1], które mogą służyć ustaleniu najbardziej prawdopodobnych przyczyn uszkodzeń przy wykorzystaniu metod naukowo-badawczych i numerycznych. Przedstawione w artykule metody mogą być przydatne przy opracowywaniu ekspertyz budowlanych.

defined in order to limit the effects of thermal phenomena in young concrete to a safe level. The key element should be the reduction of the total amount of heat released in the mass concrete by selecting an appropriate qualitative and quantitative composition of the concrete mix, including cement. Low heat cements with reduced heat of hydration are particularly advantageous in such applications, including cements with higher content of belite, blast furnace slag or fly ash. Of equal importance is the design and application of appropriate curing, ensuring proper heat dissipation from the mass concrete element in order to limit the temperature gradient. Considering these conditions at an early stage of a construction project would significantly reduce the risk of thermal damage to young concrete and the associated reduction in durability and the need for expensive repairs.

The analysis presented in the article was aimed at demonstrating the principles of expert action based on the idea of Fowler's forensic engineering [1], which may lead to determination of the most probable causes of distress, based on scientific research and numerical methods. The methods shown in the paper can be useful in practical engineering expert evaluations.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

[1] *Fowler D.W.*: Forensic Engineering = Causes of Distress in Concrete. Power Point presentation at University of Texas, http://foundationperformance.org/archived_2009/November_2009.cfm 26.10.2020

[2] *Bilcik J.*, *Sonnenschein R.*, *Gažovičová N.*: Causes of Early-Age Thermal Cracking of Concrete Foundation Slabs and their Reinforcement to Control the Cracking. Slovak Journal of Civil Engineering. **25**, 3, 2017, 8-14, DOI: 10.1515/sjce-2017-0013

[3] *Klemczak B.*: Analytical Method for Predicting Early Age Thermal Effects in Thick Foundation Slabs. Materials, **12**, 22, 2019, 3689, DOI: 10.3390/ma12223689

[4] *Flaga K.*, *Klemczak B.*: Konstrukcyjne i technologiczne aspekty naprężeń termiczno-skurczowych w masywnych i średniomasywnych konstrukcjach betonowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2016

[5] *Łukowski P.*: Decision on repair in the light of regulations of PN-EN 1504. Proceedings of the International Conference "Modern systems of bridges protection against corrosion", Kielce, 2009, 43-50

[6] *Sang Hwa Jung*, *Young Cheol Choi*, *Seongcheol Choi*: Use of ternary blended concrete to mitigate thermal cracking in massive concrete structures – A field feasibility and monitoring case study. Construction and Building Materials, **137**, 2017, 208-215, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.108

[7] *Kiernożycki W.*: Betonowe konstrukcje masywne – teoria, wymiarowanie, realizacja. Polski Cement, Kraków 2003

[8] *Flaga K.*: Naprężenia własne termiczne typu „makro" w elementach i konstrukcjach z betonu. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Monografia 106, Kraków 1990

[9] *Witakowski P.*: Technologia budowy konstrukcji masywnych z betonu. XIII Konferencja Naukowa „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych", Korbielów 2001, 76-95

[10] *Gajda J.*, *Vangeem M.*: Controlling temperatures in mass concrete. Concrete International, **24**, 1, 2002, 59-62

[11] Massige Bauteile aus Beton, Zement-Merkblatt-Betontechnik, B11, 2016, www.beton.org

[12] ACI 207.1R-05 Guide to Mass Concrete. American Concrete Institute, 2005

[13] ACI 207.2R-07 Effect of Restraint, Volume Change, & Reinforcement on Cracking of Massive Concrete. American Concrete Institute, 2007

[14] *Bamforth P.*: Concreting large-volume (mass) pours. in: Advanced Concrete Technology Processes, Newman J. and Choo B.S., eds., Chapter 13, Butterworth-Heinemann, Oxford 2003

[15] Concrete in Practice: CIP 42 – Thermal Cracking of Concrete. National Ready Mixed Concrete Association, USA 2009

[16] *Jianshu Ouyang*, *Xianming Chen*, *Zehua Huangfu*, *Cheng Lu*, *Yangbo Li*: Application of distributed temperature sensing for cracking control of mass concrete, Construction and Building Materials, **197**, 2019, 778-791, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.221

[17] *Zhu Bofang*: Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete. Elsevier Inc. Butterworth-Heinemann, 2014, UK

[18] ACI 231R-10 Report on early-age cracking: causes, measurement, mitigation. ACI Farmington Hills, USA 2010

[19] *Safiuddin Md.*, *Amrul Kaish A.B.M.*, *Woon Chin-Ong*, *Raman S.N.*: Early-Age Cracking in Concrete: Causes, Consequences, Remedial Measures and Recommendations. Applied Sciences, **8**, 10, 20181730; DOI: 10.3390/app8101730

[20] *Neville A.*: Properties of Concrete. 5th edition, Prentice Hall, 2012

[21] *Klemczak B.*, *Żmij A.*: External Restraint Factors in Early-Age Massive Foundation Slabs. ACI Structural Journal, **117**, 2, 2020, DOI: 10.14359/51721362

[22] *Du C.*, *Stabel B.*: Problems and experience in temperature control for mass concrete of Baglihar gravity dam with long construction blocks, in: New developments in dam engineering by Wieland M., Ren Q., Tan J., Taylor & Francis Group, London, 2004

[23] *Nasu S.*: Thermal stress cracking phenomena of low-heat hydration concrete with cement ingredient dependency. Proceedings of international seminar on durability and life-cycle evaluation of concrete structures, November 28-30, Tokyo, Japan, 2007 http://ssms.jp/img/files/2015/03/2007-2.2-1-5-Thermal-Stress-Cracking-Phenomena-of-Low-heat-Hydration-Concrete-with-Cement-Ingredient-Dependency.pdf 20.12.2020

[24] *Cusson D.*, *Repette W.L.*: Early age cracking in reconstructed bridge barrier walls, ACI Materials Journal, **97**, 4, 2000, 438-446

[25] PN-S-10042:1991 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe żelbetowe i sprężone. Projektowanie

[26] *Klemczak B.*, *Batog M.*, *Giergiczny Z.*, *Żmij A.*: Complex Effect of Concrete Composition on the Thermo-Mechanical Behaviour of Mass Concrete, Materials. **11**, 11, 2018, online, DOI: 10.3390/ma11112207

[27] *Hedlund H.*, *Jonasson J.E.*: Effect on stress development of restrained thermal and moisture deformation. Proceedings of the International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete (Shrinkage 2000). Edited by V. Baroghel-Bouny and P.C. Aïtcin, 2000, 355-375

[28] *Knor G.*, *Glinicki M.A.*, *Holnicki-Szulc J.*: Wyznaczanie parametrów termicznych twardniejących betonów za pomocą rozwiązania problemu odwrotnego. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **11**, 4, 2012, 281-294, DOI: 10.7409/rabdim.012.002