

PIOTR WITAKOWSKI*

USZKODZENIA TERMICZNE
PRZYCZÓŁKÓW MOSTOWYCH

THERMAL DAMAGES OF BRIDGEHEADS

Streszczenie

W artykule przedstawiono problemy techniczne związane z wykonywaniem przyczółków mostowych. Jest to w Polsce zagadnienie o dużym znaczeniu ze względu na realizowany program budowy autostrad. W ramach tego programu ma powstać kilka tysięcy obiektów, lecz ich jakość jest zagrożona ze względu na błędne wymagania zapisane w ministerialnym rozporządzeniu.

Słowa kluczowe: przyczółek mostowy, ciepło hydratacji, technologia konstrukcji masywnych

Abstract

Technical problems connected to bridge-heads executing in article have been presented. This is in Poland the question of large meaning with regard to the highways building programme realisation. Several thousand of bridge objects has to be executed in frames of this Programme. But their quality is menaced due to incorrect requirements recorded in a ministerial decree.

Keywords: bridge-heads, heat of hydration, massive structures technology

* Dr hab. inż. Piotr Witakowski, prof. AGH, Instytut Techniki Budowlanej.

1. Program budowy autostrad

W Polsce realizuje się obecnie największy program budowlany, jaki kiedykolwiek miał miejsce w naszym kraju. Jest to Program Budowy Autostrad. Kilkakrotnie zmieniany, ma obecnie kształt określony w Rozporządzeniu Rady Ministrów z 2004 r. [1] ze zmianami wprowadzonymi w 2007 r. [2] (dodano drogi ekspresowe S2 i S79) oraz w 2009 r. [3] (uzupełniono program o drogę ekspresową S61 na trasie Ostrów Mazowiecka–Suwałki–Budzisko, prowadzącą do Kowna). Zgodnie z tymi rozporządzeniami na terenie Rzeczypospolitej ma powstać sieć dróg autostrad i dróg ekspresowych o łącznej długości około 7300 km, w tym około 2000 km autostrad. Na tę sieć składać się ma 6 autostrad i 19 dróg ekspresowych, których przebieg zilustrowano na rys. 1.



Rys. 1. Przebieg autostrad i dróg ekspresowych [4]

Fig. 1. Course of highways and the express roads [4]

Wszystkie te drogi szybkiego ruchu obfitują w drogowe obiekty inżynierskie, do których zalicza się [5]:

- 1) obiekty mostowe,
- 2) tunele,
- 3) przepusty,
- 4) konstrukcje oporowe.

W terenie górzystym inżynierskie obiekty drogowe mogą stanowić nawet ponad 50% całkowitej długości trasy. Przykładowo – na oddanej w Chinach w grudniu 2010 r. linii kolejowej Yichang–Wanzhou o długości 377 km znajdują się 253 wiadukty i mosty oraz 159 tuneli o łącznej długości 278 km, co stanowi 73% długości trasy. W warunkach polskich nie ma tak ekstremalnych warunków terenowych i linie komunikacyjne przebiegają w większości przez tereny nizinne. Mimo to średnio wypada w Polsce 5 drogowych obiektów inżynierskich na każdy kilometr trasy. Są to głównie obiekty mostowe i przepusty, których istnienie jest niezbędne dla bezkolizyjnego przeprowadzenia ruchu na drogach poprzecznych, przeprowadzenia istniejących cieków powierzchniowych i zapewnienia przejść ekologicznych (dla zwierząt).

2. Obserwowane uszkodzenia termiczne przyczółków

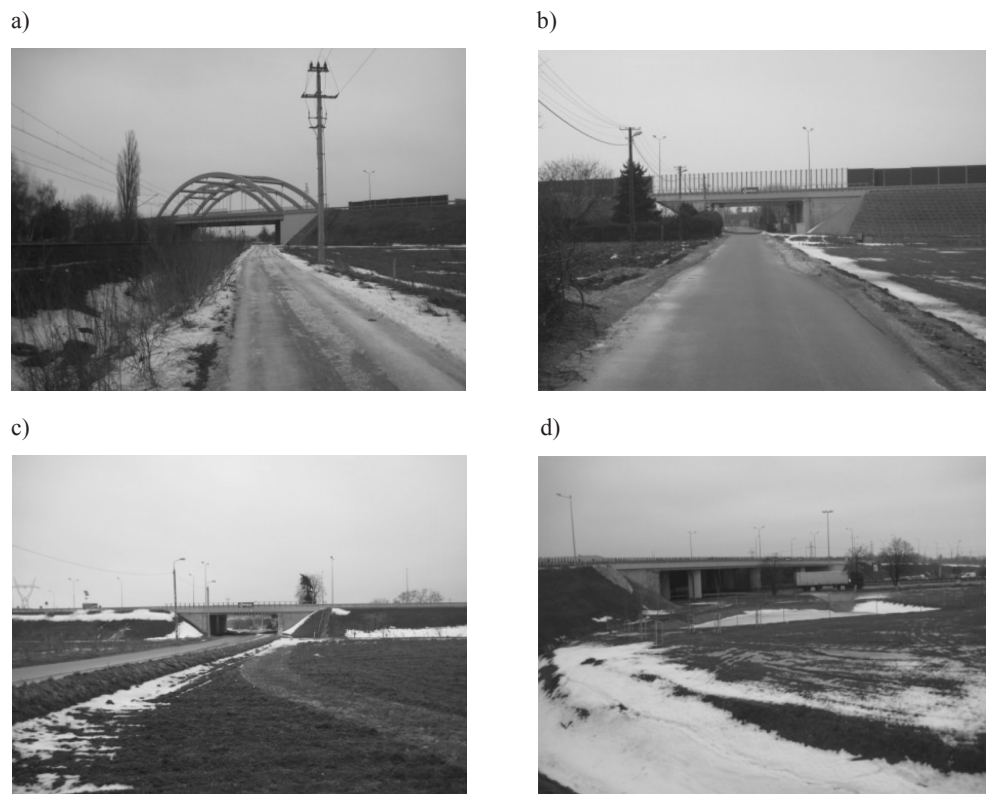
Drogowe obiekty inżynierskie są to w większości żelbetowe konstrukcje masywne i przy ich wykonywaniu należy stosować się do zasad technologii konstrukcji masywnych [6]. Konstrukcje tego typu charakteryzują się stosunkowo nieznacznym stosunkiem powierzchni, przez którą odprowadzane jest ciepło hydratacji do objętości, w której to ciepło się wydzieła. Skutkiem tego w początkowym okresie dojrzewania betonu następuje znaczny wzrost temperatury wewnętrznej obiektu powyżej temperatury zewnętrznej, a następnie również znaczny spadek temperatury w okresie ostygnięcia konstrukcji. Odształcenia termiczne wywołują często naprężenia przekraczające wytrzymałość dojrzewającego betonu, co skutkuje zarysowaniami i pęknięciami dojrzewającej konstrukcji. Podkreślenia wymaga fakt, że uszkodzenia pojawiają się w początkowym okresie dojrzewania betonu, gdy w ogóle nie ma obciążeń eksploatacyjnych, na jakie został zaprojektowany obiekt, a wytrzymałość jest znacznie niższa od projektowanej. W klasycznej technologii żelbetu i wymaganiach, jakie przed projektantem stawiają polskie normy, tego typu obciążenie w ogóle nie jest brane pod uwagę. W odróżnieniu od tego technologia konstrukcji masywnych traktuje obciążenie ciepłem hydratacji jako obciążenie podstawowe.

Poszczególnym zagadnieniom związanym z tą technologią poświęcone były kolejne referaty i publikacje autora na organizowanych w Korbielowie konferencjach „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych” [7–13]. Niestety, zasady tej technologii są stosunkowo mało znane i nie są ujęte w żadne dokumenty normatywne. Efektem tej sytuacji jest wykonywanie tych obiektów według zasad klasycznej technologii żelbetu, co bardzo często prowadzi do uszkodzenia konstrukcji jeszcze przed oddaniem jej do eksploatacji. Wobec rozmiarów realizowanego obecnie programu budowy autostrad problem ten nabiera wielkiego znaczenia, a brak zrozumienia mechanizmów zniszczenia konstrukcji masywnych powoduje liczne uszkodzenia przyczółków mostowych i konieczność kosztownych napraw. Przykładem tego mogą być uszkodzenia przyczółków mostowych na

jednym z odcinków drogi ekspresowej wykonanym w 2008 roku. Na analizowanym odcinku o długości 1300 m znalazły się 4 wiadukty drogowe, którymi prowadzona jest droga ekspresowa ponad drogami poprzecznymi i jeden przepust drogowy. Mimo zróżnicowanego usytuowania i zróżnicowanej konstrukcji (rys. 2) wszystkie wiadukty doznały podobnych uszkodzeń, choć o różnej intensywności.

We wszystkich 4 przypadkach nastąpiło podobne charakterystyczne spękanie wszystkich ścian przyczółków. W celu zilustrowania tych spękań przedstawiono na rys. 3 konstrukcję przyczółka wiaduktu WA3, a na rys. 4 widok rys, jakie zaobserwowano na ścianie przyczółka po jego rozformowaniu i ostygnięciu. Konfiguracja rys po obu stronach ściany przyczółka wskazuje, że mamy do czynienia z rysami przelotowymi – są to pęknięcia na całej grubości ściany.

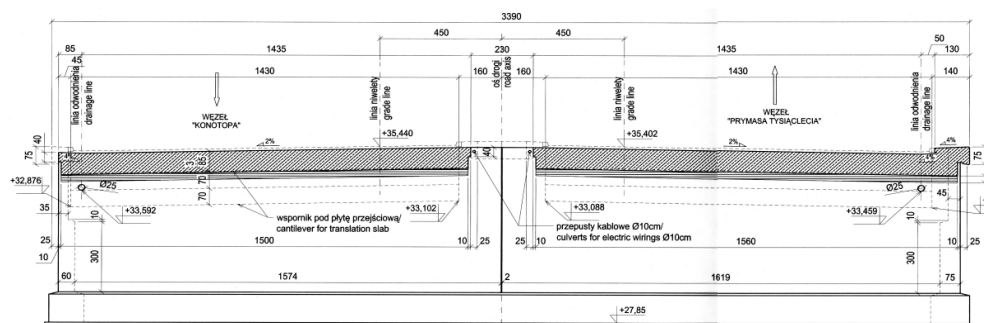
Rysy mają we wszystkich przypadkach podobną konfigurację. Biegą od fundamentu przyczółka pionowo w górę. Ich szerokość jest zmienna i idąc w górę, najpierw rośnie, a później maleje, tak że kończą się one, nie dochodząc do górnej krawędzi ściany przyczółka. Odległość między rysami na poszczególnych obiektach była zróżnicowana.



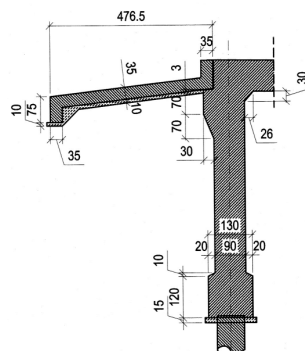
Rys. 2. Widok uszkodzonych obiektów; a) WA1 – wiadukt nad linią kolejową, b) WA3 – wiadukt nad drogą lokalną, c) WA4 – wiadukt nad drogą lokalną, d) WA5 – wiadukt nad drogą wojewódzką

Fig. 2. View of damaged objects; a) WA1 – flyover over railway line, b) WA3 – flyover over local road, c) WA4 – flyover over local road, d) WA5 – flyover over province road

a)



b)



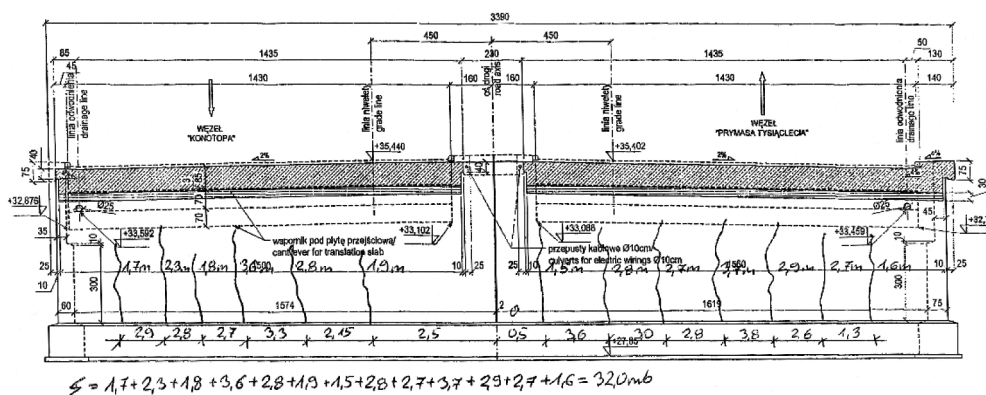
Rys. 3. Konstrukcja przyczółka wiaduktu WA3; a) widok ściany przyczółka, b) przekrój

Fig. 3. Construction of bridge-head of flyover WA3; a) view of wall of bridge-head, b) cross section

Rysy mają kierunek równoległy do kierunku zasadniczego obciążenia i tym samym do zbrojenia głównego. Jednak ze względu na przelotowy charakter otwierają drogę dla penetracji wód gruntowych i opadowych do wnętrza konstrukcji i mają zdecydowany wpływ na trwałość obiektu. Z tego powodu nie można przekazać obiektu do eksploatacji bez zamknięcia rys. Operacja zamknięcia rys wykonywana jest w drodze iniekcji ciśnieniowej. Wymaga to zatrudnienia fachowej ekipy i jest kosztowne.

O koszcie prac iniekcyjnych decyduje w pierwszym rzędzie zakres tych prac, mierzony długością rys, jakie muszą być zainiektowane. Zestawienie długości rys iniektowanych na poszczególnych obiektach przedstawiono w tabeli 1.

Zwraca uwagę fakt, że łączna długość rys do iniektowania jest tym mniejsza, im większy numer ma dany obiekt. Wiąże się to z faktem, że kolejne obiekty były wykonywane w coraz niższych temperaturach. Do sprawy tej jeszcze powrócimy w dalszej części artykułu.



Rys. 4. Inwentaryzacja rys na ścianie przyczółka od strony czołowej. Od strony zasypki rysy mają podobny przebieg

Fig. 4. Inventory of the fissures on wall of bridge-head from front side. On back side the fissures have the similar course

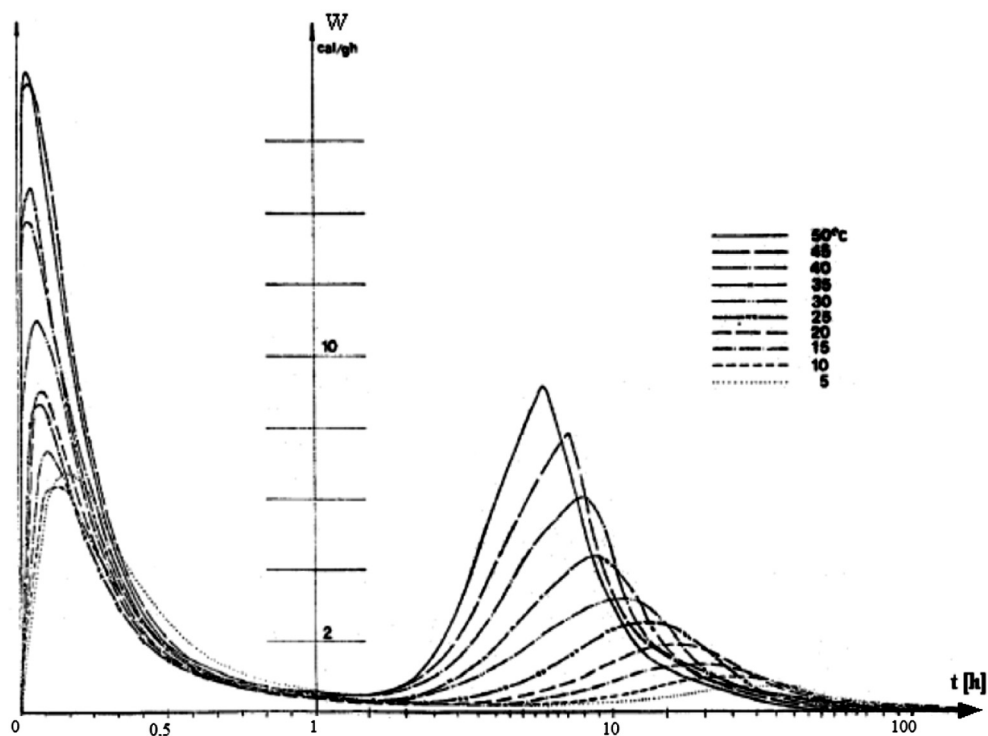
Tabela 1

**Bilans długości rys iniektowanych
na obiektach**

Lp.	Obiekt	Ilość [mb]
1	WA1	229,80
2	WA3	142,70
3	WA4	106,90
4	WA5	40,75
	Razem	520,15

3. Zjawisko i problem

Dojrzewanie betonu jest procesem polegającym na hydratacji cementu, tj. łączeniu cząstek cementu z wodą. Proces ten jest egzotermiczny i powoduje wydzielanie się ciepła zwanego ciepłem hydratacji. Całkowita ilość ciepła hydratacji wydzielającego się w betonie zależy od zawartości cementu i od jego rodzaju, natomiast szybkość (intensywność) wydzielania się ciepła hydratacji zależy od czasu i temperatury, w jakiej odbywa się hydratacja. Zjawisko to opisuje *funkcja źródeł*, której przykład przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zależność funkcji źródeł od temperatury. Cement portlandzki 45 Małogoszcz, w/c = 0,5, skala półlogarytmiczna

Fig. 5. Dependence of sources function on temperature. Portland cement 45 Małogoszcz, w/c = 0,5, half-logarithmic scale

Funkcja źródeł to gęstość mocy ciepła hydratacji, a więc jej wartości opisują ilości ciepła, jakie wydzielają się z jednostki masy cementu w jednostce czasu. Jak widać z rys. 5, wzrost temperatury powoduje przyspieszenie wydzielania się ciepła hydratacji. Wpływ temperatury na funkcję źródeł, tzw. czułość termiczną cementu, opisuje *funkcja temperatury* zdefiniowana jako:

$$f(T) = \frac{k_T}{k_{T_a}}$$

gdzie:

$f(T)$ – funkcja temperatury,

k_T – stała szybkości reakcji w temperaturze T ,

k_{T_a} – stała szybkości reakcji w temperaturze odniesienia T_a .

Za temperaturę odniesienia przyjmuje się zwykle $T_a = 20^\circ\text{C}$.

Znajomość funkcji temperatury pozwala na znalezienie *czasu sprowadzonego* t_a lub inaczej *wskaźnika dojrzałości*. Przez czas sprowadzony t_a rozumie się czas, jaki jest potrzebny przy dojrzewaniu w temperaturze odniesienia T_a , aby beton uzyskał taki sam stopień dojrzałości (cement – taki sam stopień hydratacji), jak podczas dojrzewania przy zmiennej temperaturze $T(t)$. Można wykazać, że zachodzi związek.

$$t_a(t) = \int_0^t f(T(\tau)) d\tau$$

co oznacza, że przy stałej temperaturze T otrzymujemy:

$$t_a = f(T)t$$

Pojęcie wskaźnika dojrzałości wprowadził po raz pierwszy A.G.A. Saul w 1951 r. [14], a pojęcie funkcji temperatury E. Rastrup w 1954 roku. Podaną przez siebie pierwotnie funkcję [15] Rastrup oparł na znanej z chemii fizycznej regule van't Hoffa. Zgodnie z tą regułą znaną z chemii fizycznej przyrost temperatury o 10°C przyspiesza dwukrotnie szybkość reakcji chemicznych. Na tej podstawie Rastrup przyjął, że funkcja temperatury ma postać:

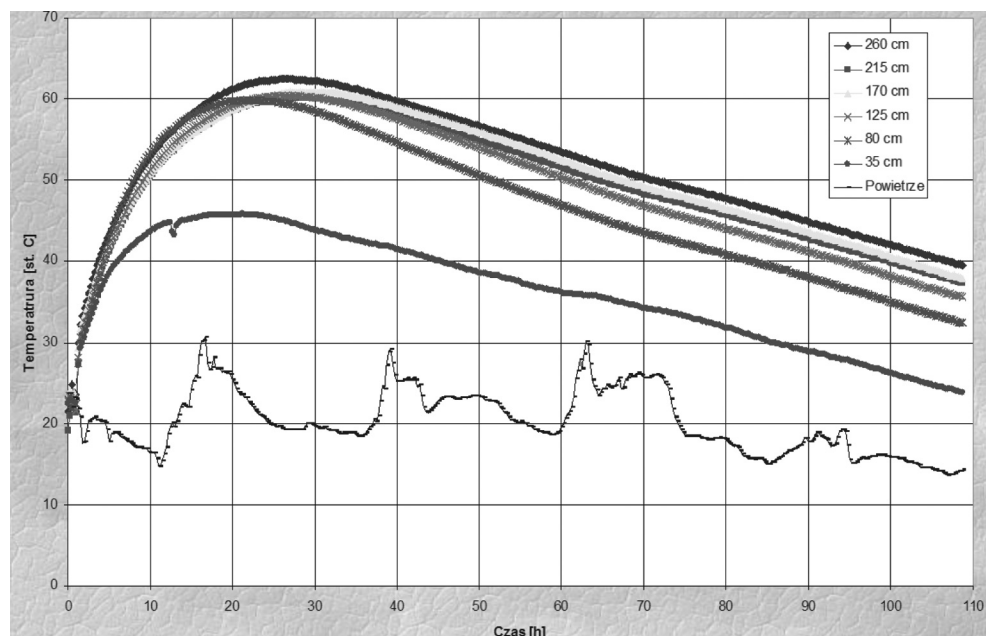
$$f(t) = 2^{\frac{T-T_a}{10}}$$

Jak widać, zjawisko wydzielania się ciepła hydratacji ma charakter samosprężony – wydzielające się ciepło podnosi temperaturę ośrodka, a to z kolei powoduje zwiększenie szybkości hydratacji i dalszy wzrost temperatury. Zjawisko to jest tym intensywniejsze, im trudniejsze jest odprowadzanie ciepła na zewnątrz, a więc im bardziej masywny jest dojrzewający element lub skuteczniejsza izolacja termiczna na jego powierzchni.

W wyniku zachodzącego procesu hydratacji wzrasta sztywność i wytrzymałość betonu, lecz jednocześnie biegnie proces termiczny, w wyniku którego temperatura wewnątrz dojrzewającego elementu najpierw wzrasta do maksimum, a następnie spada do wyrównania z temperaturą otoczenia. Maksimum temperatury i czas jego wystąpienia zależą od wielu czynników, lecz w szczególności od położenia badanego punktu i jego odległości od chłodzonego brzegu. Zawsze jednak wzrost temperatury jest tym większy, im bardziej odległy od brzegu jest badany punkt i zawsze po fazie nagrzewania następuje faza ostygnięcia (rys. 6).

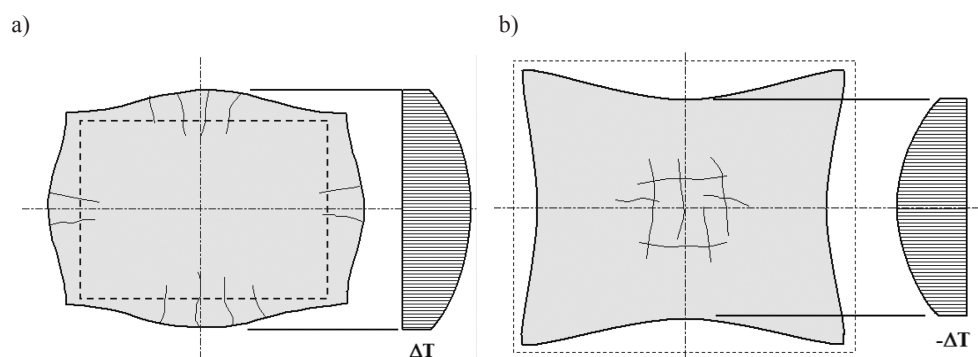
W swobodnie podpartym bloku powoduje to w fazie nagrzewania naprężenia rozciągające na brzegu, a w fazie ostygnięcia w środkowej strefie bloku (rys. 7). W fazie nagrzewania środek bloku rozgrzewa się do wyższej temperatury niż brzeg, co powoduje rozciąganie stref brzegowych – mechanizm bezpośredniego rozciągania. W fazie ostygnięcia środek brzegu kurczy się bardziej niż brzeg, co na skutek oporu stref brzegowych powoduje rozciąganie strefy środkowej – jest to *mechanizm powstrzymywania* (ang. *restraint mechanism*). Największe niebezpieczeństwo powoduje fakt, że zawsze po fazie nagrzewania następuje faza ostygnięcia. Jeśli więc w fazie nagrzewania nastąpi zarysowanie strefy brzegowej, wówczas w fazie ostygnięcia istniejące rysy zostają przedłużone na strefę środkową, dzieląc cały blok na oddzielne fragmenty połączone jedynie prętami zbrojenia – blok traci monolityczność i tworzy się tzw. struktura różańca.

Opisane zjawisko komplikuje się w przypadku, gdy mamy do czynienia z ograniczeniem swobody odkształceń przez zewnętrzne więzy. Taka sytuacja zdarza się podczas dojrzewania ściany przyczółka mostowego. Niezależnie od wszelkich różnic przyczółki te wykonuje się w ten sposób, że najpierw betonuje się fundament przyczółka, a dopiero po jego stwardnieniu i ostygnięciu przystępuje się do wykonywania samej ściany. Dojrzewanie tej ściany następuje w sytuacji, gdy dolna jej powierzchnia jest utwardzona w stwardniałym fundamencie i nie ma możliwości odkształceń. Sytuację tę ilustruje rys. 8.



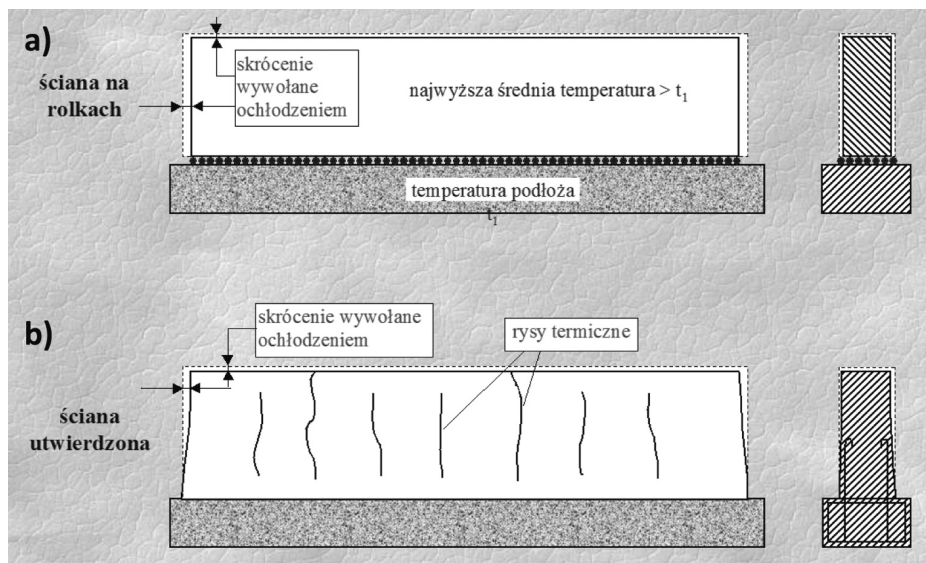
Rys. 6. Przykładowy rozwój temperatury wewnątrz dojrzewającego bloku betonowego. Liczby w legendzie rysunku ukazują odległość badanego punktu od brzegu

Fig. 6. Example of temperature development inside of maturing concrete block. The numbers in legend of drawing portray the distance of studied point from boundary



Rys. 7. Deformacje i zmiany temperatury w przekroju swobodnie dojrzewającego bloku:
a) faza nagrzewania, b) faza ostygnięcia

Fig. 7. Deformations and the change of temperature in section of the freely maturing block:
a) the phase of warming, b) the phase of cooling



Rys. 8. Dojrzewanie ściany żelbetowej zabetonowanej na stwardniałym fundamencie: a) deformacje ściany w fazie ostygania w przypadku braku połączenia z fundamentem (ściana na rolkach), b) deformacje ściany w rzeczywistych warunkach – wspólne zbrojenie fundamentu i ściany uniemożliwia jakiejkolwiek przesunięcia względne

Fig. 8. Maturation of a reinforced concrete wall on hardened foundation: a) the deformations of wall in phase of cooling in case of lack of connection with foundation (wall on rolls), b) deformations of wall in real conditions – common reinforcement of the foundation and the wall makes impossible any relative displacement

Gdyby dojrzewająca ściana była posadowiona na fundamencie w sposób zapewniający swobodę przemieszczeń (umownie – na rolkach), wówczas podlegałaby takim deformacjom, jak pokazano na rys. 7. Do zarysowania mogłoby dojść tylko podczas dużej różnicy temperatur między strefą brzegową a środkową. W rzeczywistych warunkach ściana nie ma żadnej możliwości przesuwu po fundamencie ze względu na wspólne zbrojenie. W tym przypadku nawet równomierny spadek temperatury w całej ścianie skutkuje pojawieniem się mechanizmu powstrzymywania. Mechanizm ten jest tym silniejszy, im większy spadek temperatury, toteż najwcześniej może ulec zarysowaniu wewnętrzna, niewidoczna strefa ściany. Przy dostatecznie dużym spadku temperatury zarysowaniu w fazie ostygania mogą ulec również zewnętrzne powierzchnie ściany, choćby w fazie nagrzewania zachowały monolityczność mimo mechanizmu bezpośredniego rozciągania.

Podsumowując tę część rozważań, trzeba stwierdzić, że występujący w fazie nagrzewania mechanizm bezpośredniego rozciągania może uszkodzić konstrukcję tylko przy dostatecznie dużej różnicy temperatur wewnątrz dojrzewającego elementu, co w praktyce oznacza duże rozmiary dojrzewającego bloku – blok musi być konstrukcją masywną. Występujący natomiast w fazie ostygania mechanizm powstrzymywania jest niezależny od rozmiarów elementu i występuje zawsze – nawet w konstrukcjach cienkościennych – jeśli tylko odebrana jest swoboda odkształceń i następuje dostatecznie duży spadek temperatury elementu. Jego

występowaniu sprzyja oczywiście duża masywność elementu, gdyż w sposób naturalny pojawia się tam duży przyrost temperatury w fazie nagrzewania, a w konsekwencji duży spadek temperatury w fazie ostygania.

Z taką właśnie sytuacją mamy do czynienia w przypadku ścian przyczółków mostowych, które z reguły są konstrukcjami o dużej masywności, a jednocześnie wykonywane w sposób uniemożliwiający swobodę odkształceń podczas dojrzewania.

Kluczowe znaczenie ma wielkość spadku temperatury, który przy braku swobody odkształceń powoduje zarysowanie. Sprawa ta jest nieco bardziej skomplikowana w przypadku betonu dojrzewającego, a więc o zmiennym module odkształcalności, natomiast dla betonu dojrzałego wielkość tę można łatwo wyliczyć. Odkształcenie termiczne ε wyraża się zależnością:

$$\varepsilon = \alpha_T \Delta T$$

gdzie:

α_T – współczynnik odkształcalności termicznej betonu,
 ΔT – zmiana temperatury.

Ponieważ odkształcenie graniczne przy rozciąganiu wynosi dla betonu $\varepsilon_{gr} = 10^{-4}$, a współczynnik odkształcalności termicznej $\alpha_T = 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, więc $\Delta T_{gr} = 10^{\circ}\text{C}$. Oznacza to, że dojrzały element betonowy przy braku możliwości odkształceń ulegnie zarysowaniu już przy spadku temperatury o 10°C . Gdy zmiany temperatury następują równocześnie ze zmianami sztywności, wielkość ta może być o kilka stopni wyższa.

Z powyższej analizy wynika, że w sytuacji betonowania przyczółków mostowych w warunkach letnich tylko świadome stosowanie technologii konstrukcji masywnych w miejsce klasycznej technologii betonu pozwala na zachowanie monolityczności przyczółków.

4. Technologia konstrukcji masywnych versus technologia betonu

Podstawowe zasady technologii konstrukcji masywnych znaleźć można w pracach [6, 7]. Poniżej zestawiono najważniejsze różnice między zasadami tej technologii a zasadami klasycznej technologii betonu.

1. Wykonywanie konstrukcji masywnych według zasad klasycznej technologii betonu – ujętej w normy i zalecenia – może prowadzić do ich uszkodzenia lub zniszczenia, paradoksalnie tym większego, im skrupulatniej wypełnia się zalecenia.
2. W technologii konstrukcji masywnych zasadniczym obciążeniem jest ciepło hydratacji cementu – obciążenie nieistniejące w technologii betonu.
3. W konstrukcjach masywnych to nie siły (naprężenia) wywołują deformacje (odkształcenia), lecz deformacje wywołują siły.
4. W technologii betonu przyjmuje się, że beton ma wytrzymałość określoną klasą, co jest zupełnie pozbawione sensu w technologii konstrukcji masywnych. Obciążenie termiczne występuje tu wtedy, gdy dopiero zaczyna się kształtować struktura betonu.
5. W projektowaniu odpowiadającym klasycznej technologii betonu jako podstawowy pewnik przyjmuje się zgodność odkształceń zbrojenia i betonu, co jest bezpodstawne w technologii konstrukcji masywnych. W fazie nagrzewania praktycznie w ogóle nie ma przyczepności betonu do stali.

6. W projektowaniu konstrukcji betonowych przyjmuje się, że obciążenie, które przychodzi, jest grawitacyjne lub są to siły zewnętrzne, natomiast w konstrukcjach masywnych zasadnicze obciążenie jest wewnętrzne.
7. W projektowaniu konstrukcji betonowych, gdy naprężenia obliczeniowe przekraczają wytrzymałość, należy powiększyć przekrój, natomiast w konstrukcjach masywnych należy zmniejszyć przekrój.
8. Beton jest materiałem dojrzewającym, lecz projektowanie konstrukcji betonowych zakłada, że jest on już dojrzały i ma własności ustalone, natomiast przy projektowaniu konstrukcji masywnych należy uwzględnić zmianę stanu skupienia i ciągłą zmianę własności.

Podsumowując – ani rodzaj obciążenia, ani czas jego występowania, ani podstawowe założenia klasycznej technologii betonu nie są spełnione w przypadku konstrukcji masywnych, i technologia konstrukcji masywnych różni się w sposób istotny od klasycznej. Projektowanie i technologia wykonania według klasycznej teorii żelbetu mają na celu przeniesienie w dojrzłym betonie sił wewnętrznych od ustalonego zewnętrznego obciążenia. Projektowanie konstrukcji masywnych ma na celu niedopuszczenie do pojawienia się obciążenia niszczącego w czasie dojrzewania. W konstrukcjach zewnętrznie statycznie niewyznaczalnych jest to równoznaczne z wymaganiem obniżenia przyrostu temperatury. W konstrukcjach statycznie wyznaczalnych warunek ten może być zastąpiony przez obniżenie różnic temperatury wewnątrz dojrzewającego elementu, choć obniżenie przyrostu jest zawsze bezpieczniejsze.

Dla uzyskania tego celu technologia konstrukcji masywnych dysponuje 5 grupami czynników technologicznych (rys. 9). Trzy spośród tych czynników:

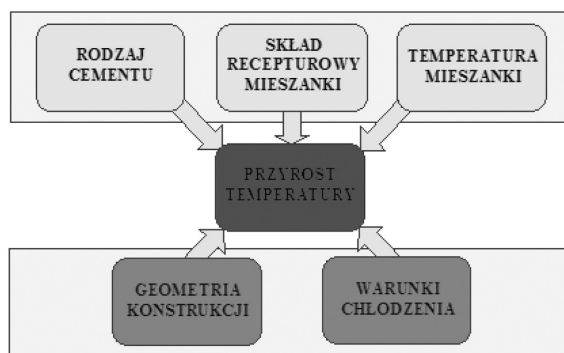
- rodzaj cementu,
- skład recepturowy mieszanki,
- temperatura mieszanki,

są dostępne przed rozpoczęciem betonowania i nie wymagają żadnej ingerencji w plac budowy. Dwa pozostałe, tj.:

- geometria konstrukcji,
- warunki chłodzenia,

wymagają nie tylko działań na placu budowy, lecz zwykle dokładnego projektu technologicznego. Wpływanie na geometrię konstrukcji oznacza taki podział konstrukcji na etapy (bloki) betonowania [11], aby uzyskać stosowny współczynnik masywności i zapewnić możliwość chłodzenia powierzchniowego. Przez warunki chłodzenia trzeba natomiast rozumieć nie tylko chłodzenie powierzchniowe zewnętrzne, lecz również ewentualne wewnętrzne chłodzenie rurowe. Wymaga to oczywiście wykonania całej instalacji chłodzącej przed rozpoczęciem betonowania.

Warunkiem niezbędnym przy technologii konstrukcji masywnych jest prowadzenie monitoringu temperatury wewnętrznej. Wymaga to odpowiedniej aparatury pomiarowej i przygotowania środków na wypadek konieczności interwencji w sytuacji zaobserwowanego odstępstwa od prawidłowego przebiegu temperatury [8]. W praktyce oznacza to konieczność stosowania systemu zdalnego monitoringu [13].



Rys. 9. Grupy czynników technologicznych, które decydują o przyroście temperatury wewnątrz dojrzewającej konstrukcji żelbetowej

Fig. 9. Group of technological factors which decide about increase of temperature inside the ripening reinforced concrete construction

5. Diagnoza

Uszkodzenia przyczółków mostowych, o których mowa w rozdziale 2, są typowym efektem wykonywania konstrukcji masywnej nie według zasad technologii konstrukcji masywnych, lecz według zasad klasycznej technologii betonu. Jak widać, ważna jest decyzja, według której technologii betonować. Odpowiedź na to pytanie jest taka, że jeśli z analizy wynika, iż przyrost temperatury i późniejszy spadek nie przekroczą 10°C , to nie musimy się przejmować ciepłem hydratacji i możemy stosować klasyczną technologię. Wymaga to jednak przeprowadzenia symulacji komputerowej i ustalenia zmian pola temperatury wewnątrz wykonywanego obiektu. Jeśli takiej analizy nie przeprowadzono, to pierwszym wskaźnikiem, który mówi o znaczeniu obciążenia ciepłem hydratacji, jest tzw. współczynnik masywności pozornej m_p (inaczej pozorny moduł powierzchniowy). Przez współczynnik ten rozumie się stosunek powierzchni, przez którą odbywa się chłodzenie elementu do jego objętości. Współczynnik ten jest miarą trudności w odprowadzaniu ciepła hydratacji cementu z wnętrza dojrzewającego elementu.

Jeśli ściana przyczółka ma grubość g i wysokość betonowania h , wówczas przed rozdeskowaniem (gdy chłodzenie odbywa się tylko przez górną powierzchnię elementu) współczynnik masywności pozornej wyraża się wzorem:

$$m_p = \frac{g}{gh} = \frac{1}{h} \quad [\text{m}^{-1}]$$

natomiast po zdjęciu deskowania chłodzenie odbywa się przez powierzchnię górną i obie powierzchnie boczne, toteż współczynnik ten wyraża się zależnością:

$$m_p = \frac{g + 2h}{gh} \quad [\text{m}^{-1}]$$

Umownie wszystkie elementy dzielimy na:

- elementy o dużej masywności, dla których $m_p \leq 2$,
- elementy o średniej masywności, dla których $2 \leq m_p \leq 15$,
- elementy o małej masywności, dla których $15 \leq m_p$.

W elementach o dużej masywności ciepło hydratacji stanowi zasadnicze obciążenie i należy stosować się do zaleceń technologii konstrukcji masywnych. W elementach o średniej masywności sytuacja nie jest jednoznaczna i niekiedy trzeba uwzględniać obciążenie ciepłem hydratacji, lecz nie zawsze. Natomiast w elementach o małej masywności można obciążenia ciepłem hydratacji nie uwzględniać.

W tabeli 2 zestawiono wymiary i współczynniki masywności dla analizowanych ścian. Wynika z niej, że w fazie deskowania wszystkie analizowane elementy stanowią obiekty o dużej masywności. Po zdjęciu deskowania korpusy przyczółków WA-1 i WA-5 nadal są elementami o dużej masywności, lecz pozostałe stają się obiektami o średniej masywności, aczkolwiek ich masywność niewiele odbiega od granicznej wartości 2. Oznacza to, że przy wykonywaniu wszystkich przyczółków należało uwzględniać obciążenie ciepłem hydratacji i stosować technologię konstrukcji masywnych. Z tabeli tej łatwo odnaleźć zależność między liczbą rys a współczynnikiem masywności pozornej i temperaturą w czasie betonowania.

Tabela 2

Zestawienie wymiarów, temperatur betonowania i rys

Lp.	Obiekt	Grubość g [m] Etap I	Długość l [m] Etap I	Wysokość h [m] Etap I	Współczynnik masywności pozornej* m_p [m ⁻¹]		Zakres zmian temperatury w okresie betonowania** [°C]	Liczba rys
1	WA-1	1,50	18,27	7,50	0,13	1,47	od 09 do 18	18
2	WA-3	0,90	16,34	4,80	0,21	2,43	od 14 do 28	23
3	WA-4	0,85–1,15	16,34	3,97–4,21	0,24	2,24	od 18 do 29	22
4	WA-5	1,20	19,26	6,35–6,87	0,15	1,82	od 05 do 17	9

* w pierwszej kolumnie podano wartość przed rozdeskowaniem, a w drugiej po rozdeskowaniu

** temperatury ustalono według strony <http://www.meteoprog.pl/pl/fwarchive/Warszawa/>

Niestety, wszystkie te obiekty zastały wykonane zgodnie z klasyczną technologią betonu, tj. bez uwzględnienia obciążenia ciepłem hydratacji, i doznały uszkodzeń, o których była mowa.

6. Piramida przyczyn

Uszkodzenia przyczółków musiały zostać naprawione, lecz wykonanie naprawy wcale nie zamknęło sprawy. Problemem stało się ustalenie winnego uszkodzeń, gdyż on powinien ponieść koszty naprawy. Doprowadziło to do ostrego sporu między projektantem a wykonawcą. Wykonawca twierdził, że zastosował się ściśle do wymogów projektu, a tym samym

pojawienie się uszkodzeń świadczy o wadzie projektu i winie projektanta. Projektant zaś twierdzi, że wykonany przez niego projekt spełnia wszystkie wymagania normowe i przeszedł pomyślnie weryfikację, a tym samym pojawienie się uszkodzeń świadczy o złym wykonawstwie i winie wykonawcy. Analizując rzecz w kategoriach formalnych, nie ma winnych – projekt spełnia wszystkie formalne wymagania, a wykonawca wykonał obiekty zgodnie z projektem i wszystkimi formalnymi wymaganiami technologicznymi. Fakt, że obiekty wykonane według wszelkich zasad formalnej sztuki inżynierskiej doznały uszkodzeń, świadczy o ułomności zasad formalnych. Przy bliższej analizie okazuje się, że błędy formalne układają się w całą piramidę.

6.1. Przyczyna – rozporządzenie ministerialne

Na szczycie piramidy błędów leży Rozporządzenie MTIGM w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie [5]. Rozporządzenie to wprowadza szczegółowe wymagania wobec rodzaju cementu, jaki ma być stosowany do budowy inżynierskich obiektów drogowych. Czytamy w nim m.in.:

„§ 164. 1. Do wykonania betonów, o których mowa w § 163 ust. 2, powinien być zastosowany cement portlandzki CEM I niskoalkaliczny:

- 1) do betonu klasy B25 – klasy 32,5 NA,
 - 2) do betonu klasy B30, B35 i B40 – klasy 42,5 NA,
 - 3) do betonu klasy B45 i większej – klasy 52,5 NA,
- spełniający wymagania Polskiej Normy, z zastrzeżeniem ust. 2.

2. Cement, o którym mowa w ust. 1, powinien charakteryzować się następującym składem:

- 1) zawartość określona ułamkiem masowym krzemianu trójwapniowego (alitu) C3S – nie większa niż 60%,
 - 2) zawartość określona ułamkiem masowym glinianu trójwapniowego C3A – nie większa niż 7%,
 - 3) zawartość określona ułamkiem masowym $C4AF + 2 \times C3A$ – nie większa niż 20%.
3. Dopuszcza się, w razie potrzeby, zastosowanie cementów o wysokiej wczesnej wytrzymałości”.

Już samo narzucenie przez rozporządzenie ministerialne rodzaju cementu i określanie w nim jego składu mineralogicznego jest kuriozalne. Na domiar złego rozporządzenie to wymusza stosowanie najgorszego cementu z punktu widzenia obciążeń ciepłem hydratacji i technologii konstrukcji masowych. Trzeba podkreślić – nie ma gorszego, tj. bardziej kalorycznego niż cement CEM I.

Całość treści rozporządzenia wskazuje, że jego autorzy nie wiedzieli o wydzielaniu się ciepła hydratacji i zagrożeniach, jakie ono powoduje dla monolityczności elementu.

6.2. Ogólne specyfikacje techniczne – OST

Kolejnym elementem w budowie systemu wymagań formalnych są specyfikacje techniczne. Specyfikacja techniczna jest dokumentem o zasadniczym znaczeniu dla całego procesu kosztorysowania, projektowania i wykonywania obiektu, gdyż jednocześnie jest dokumentem:

- przetargowym – określającym zakres czynności i robót zawartych w poszczególnej pozycji ślepego kosztorysu (przedmiaru) i umożliwiającym prawidłowe ustalenie ceny jednostkowej tej pozycji przy opracowaniu oferty przez oferenta uczestniczącego w przetargu,
- umownym – stanowiącym załącznik, wraz z innymi dokumentami przetargowymi, do umowy podpisanej przez zamawiającego i wykonawcę (oferenta, który wygrał przetarg),
- wykonawczym – obowiązującym z innymi dokumentami wykonawcę i nadzór zamawiającego przy wykonywaniu, kontroli i odbiorze robót.

W drogownictwie jest prawnie wymagane istnienie i stosowanie specyfikacji, co wynika m.in. z przepisów zawartych w:

- ustawie Prawo zamówień publicznych stwierdzającej, że zamawiający opisuje przedmiot zamówienia na roboty budowlane za pomocą dokumentacji projektowej oraz specyfikacji technicznej wykonania i odbioru robót budowlanych, (Dz. U. z 2004 r., Nr 19, poz. 177 – z późniejszymi zmianami, art. 31),
- rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 2 września 2004 r. w sprawie szczegółowego zakresu i formy dokumentacji projektowej, specyfikacji technicznych wykonania i odbioru robót budowlanych oraz programu funkcjonalno-użytkowego (Dz. U. Nr 202, poz. 2072),
- rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie ustalającym, że wbudowane materiały i wyroby mają spełniać wymagania Polskich Norm i specyfikacji robót drogowych (Dz. U. Nr 43, poz. 430).

Ogólna specyfikacja techniczna OST jest wzorcowym zbiorem przepisów i wymagań mających zastosowanie przy realizacji asortymentu robót. OST stosuje się obecnie dla robót drogowych i mostowych (inwestycyjnych i utrzymaniowych) oraz dla prac geodezyjnych związanych z drogownictwem. Dla robót mostowych OST są opracowywane przez Branżowy Zakład Doświadczalny Budownictwa Drogowego i Mostowego i publikowane przez GDDKiA. OST stanowią materiał pomocniczy do opracowania szczegółowych specyfikacji technicznych SST wykonania i odbioru robót budowlanych. Natomiast SST wykonywane przez biuro projektowe są dokumentem przetargowym i kontraktowym – wchodzi w skład umowy z wykonawcą. Dokumenty, jakie od strony formalnej muszą być przygotowane dla budowy drogi lub obiektu drogowego, przedstawiono na rys. 10, przy czym ramowy układ OST zilustrowano w tab. 3.

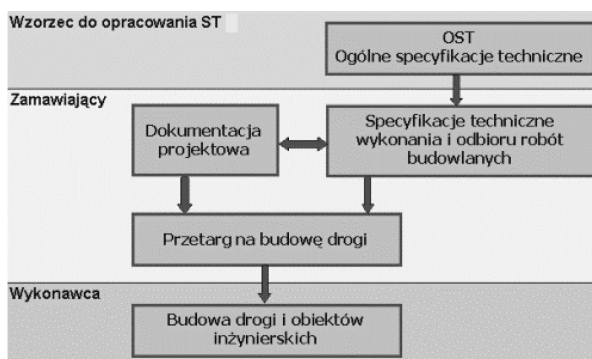
Całość treści OST wskazuje, że jej autorzy nie wiedzieli o wydzielaniu się ciepła hydratacji i zagrożeniach, jakie ono powoduje dla monolityczności elementu.

6.3. Szczegółowa specyfikacja techniczna – SST

Na podstawie OST biuro projektowe, które wykonało projekt, przygotowało również szczegółową specyfikację techniczną (SST) dla analizowanej trasy ekspresowej. Treść tej specyfikacji powtarza zapisy ze wspomnianego rozporządzenia dotyczące materiałów i w ogóle nie wspomina o problemach termicznych.

Treść SST wskazuje, że jej autorzy nie wiedzieli o wydzielaniu się ciepła hydratacji i zagrożeniach, jakie ono powoduje dla monolityczności elementu.

Na podkreślenie zasługuje też fakt, że w SST w ogóle nie stawia się wymogu zachowania monolityczności.



Rys. 10. Struktura dokumentów niezbędnych dla przeprowadzenia przetargu na wykonanie inwestycji drogowych

Fig. 10. Structure of indispensable documents for execution of the auction on realisation of road investments

6.4. Program zapewnienia jakości – PZJ

Tabela 3

Ramowy układ OST

Nr punktu	Nazwa punktu specyfikacji	Występujące podpunkty
1	Wstęp (część ogólna)	Przedmiot, zakres stosowania, zakres robót, określenia podstawowe, ogólne wymagania dotyczące robót
2	Materiały	Ogólne wymagania oraz wymagania dotyczące poszczególnych materiałów, ich przechowywania i składowania
3	Sprzęt	Ogólne wymagania oraz wymagania dotyczące stosowania sprzętu
4	Transport	Ogólne wymagania oraz wymagania dotyczące transportu stosowanych materiałów, środków transportu i sposobu transportowania
5	Wykonanie robót	Ogólne zasady wykonania robót, szczegółowe wymagania dotyczące wykonania robót, ew. ustalenia dotyczące mieszanek

6	Kontrola jakości robót	Ogólne zasady kontroli jakości robót, badania i pomiary (sposób i częstotliwość), ocena wyników badań
7	Obmiar robót	Ogólne zasady obmiaru robót, jednostka obmiarowa
8	Odbiór robót	Ogólne zasady odbioru robót, odbiór robót zanikających i ulegających zakryciu, odbiór częściowy, końcowy i ostateczny
9	Podstawa płatności	Ogólne ustalenia dotyczące podstawy płatności, cena jednostki obmiarowej oraz spis sposobu rozliczania robót tymczasowych i prac towarzyszących
10	Przepisy związane	Normy, inne dokumenty

Dla odpowiedzialnych inwestycji wykonawca powinien przedstawić do zatwierdzenia nadzorowi inwestorskiemu dokument o nazwie program zapewnienia jakości – PZJ. Jest to dokument, w którym wykonawca ukazuje, w jaki sposób zamierza spełnić wymagania SST. Tak też się stało w analizowanym przypadku. Niestety, przygotowany PZJ odnosi się wyłącznie do kwestii występujących w SST i całkowicie pomija kwestię obciążenia ciepłem hydratacji. Ponadto w PZJ nie widzi się konieczności zachowania monolityczności konstrukcji.

Całość treści PZJ wskazuje, że jego autorzy nie wiedzieli o wydzielaniu się ciepła hydratacji i zagrożeniach, jakie ono powoduje dla monolityczności elementu.

6.5. Wybór cementu

Kolejnym dokumentem na drodze ustalania sposobu wykonania obiektu jest wybór przez wykonawcę rodzaju cementu i zatwierdzenie go przez inspektora nadzoru. Z analizowanych dokumentów wynika, że do wykonania mieszanek betonowych stosowanych przy betonowaniu wspomnianych ścian przyczółków mostowych wybrano cement **CEM I 42,5 R Chelm**.

Jest to prawdopodobnie najgorszy cement, jaki można znaleźć w Polsce, gdyż:

- spośród wszystkich rodzajów cementów przewidzianych normą PN EN 197-1 rodzaj CEM I jest najbardziej kaloryczny,
- spośród dostępnych klas klasa 42,5 jest znacznie bardziej kaloryczna niż 32,5 (bardziej kaloryczna jest już tylko klasa 52,5, lecz cementownia „Chelm” jej nie produkuje),
- spośród typów N i R zupełnie fatalny był wybór typu R – nawet przy tej samej kaloryczności wydziela on ciepło hydratacji znacznie szybciej niż typ N,
- spośród wszystkich cementów produkowanych w Polsce cementy z cementowni „Chelm” od dawna charakteryzują się najwyższymi ciepłem hydratacji wśród cementów tego samego rodzaju, klasy i typu.

Wybór cementu wskazuje, że autorzy receptur i inspektor nadzoru nie wiedzieli o wydzielaniu się ciepła hydratacji i zagrożeniach, jakie ono powoduje dla monolityczności elementu.

6.6. Ustalenie składu mieszanki

Do wykonania przyczółków opracowano dwie recepty – na beton B30 i na beton B35. Obie receptury charakteryzują się składem typowym dla zwykłych (niemasywnych) konstrukcji. Z punktu widzenia technologii konstrukcji masywnych uderza nadmierna ilość cementu. Wytrzymałości, jakie uzyskały betony wykonane według receptur ukazanych w dokumentacji, wyniosły:

- dla betonu B30: $R_{sr} = 45,2$ MPa, $R_{min} = 44,8$ MPa – nadmiar wytrzymałości 51%,
- dla betonu B35: $R_{sr} = 49,6$ MPa, $R_{min} = 49,3$ MPa – nadmiar wytrzymałości 42%,

a więc mają zbyt wysokie nadmiary wytrzymałości w stosunku do wymagań projektowych. Świadczy to o dbałości wyłącznie o efekty wytrzymałościowe bez zwracania uwagi na efekty termiczne – zastosowanie dla klasy B30 dozowania cementu w ilości 355 kg/m^3 , a dla klasy B35 aż 375 kg/m^3 dowodzi całkowitego zignorowania problemów termicznych. W składzie recepturowym nie ma żadnego uwzględnienia ani warunków chłodzenia, ani temperatury mieszanki i otoczenia. Dopuszcza się do układania nawet mieszankę o temperaturze 28°C !

Skład przyjętych mieszanek wskazuje, że autorzy receptur i inspektor nadzoru nie wiedzieli o wydzielaniu się ciepła hydratacji i zagrożeniach, jakie ono powoduje dla monolityczności elementu.

6.7. Technologia betonowania

Analiza dokumentów wykonanych w okresie betonowania przyczółków wskazuje na następujące okoliczności:

- zastosowano beton towarowy, nie stawiając dla węzła betoniarskiego żadnych wymagań termicznych wobec mieszanki,
- nie prowadzono pomiarów temperatury dostarczanej mieszanki i nie ograniczano wysokości betonowania ze względu na temperaturę mieszanki,
- nie uwzględniano temperatury powietrza i nie dostosowywano czasu betonowania podczas kolejnych betonowań do temperatury atmosfery i nasłonecznienia – w czasie upałów nie przenoszono betonowania na okres nocny,
- betonowania nie poprzedzono przygotowaniem środków chłodzenia w postaci np. instalacji do technologii chłodzenia rurowego (ang. *pipe cooling*),
- układania betonu nie poprzedzono żadną analizą termiczną,
- jako deskowanie przyjęto systemowe deskowanie firmy PERI typu TRIO – deskowanie z grubej sklejki czarnego koloru,
- przy ustalaniu wysokości układania betonu (etapowaniu) nie brano pod uwagę ani temperatury mieszanki, ani temperatury powietrza.

Zastosowana technologia wskazuje, że wykonawcy nie wiedzieli o wydzielaniu się ciepła hydratacji i zagrożeniach, jakie ono powoduje dla monolityczności elementu.

6.8. Technologia pielęgnacji

Analiza dokumentacji wykonawczej wskazuje, że podczas pielęgnacji:

- nie stosowano ani chłodzenia wewnętrznego (rurowego), ani powierzchniowego betonu,
- nie prowadzono pomiaru temperatury dojrzewającego betonu,
- nie odnotowano ani wartości, ani czasu wystąpienia maksimum temperatury,
- mimo że do budowy obiektów zastosowano deskowanie ścienne TRIO, nie prowadzono w czasie wysokich temperatur ani chłodzenia powierzchniowego deskowania, ani osłon termicznych od operacji słonecznej,
- deskowanie zdjęto bez zwracania uwagi na temperaturę betonu.

Zastosowana technologia pielęgnacji wskazuje, że wykonawcy nie wiedzieli o wydzielaniu się ciepła hydratacji i zagrożeniach, jakie ono powoduje dla monolityczności elementu.

7. Wnioski

Przeprowadzona analiza dokumentów formalno-prawnych regulujących zasady projektowania i wykonywania inżynierskich obiektów drogowych wskazuje, że ściśle ich przestrzeganie nie tylko nie gwarantuje braku uszkodzeń wykonanego obiektu, lecz przeciwnie – zwykle prowadzi do uszkodzeń. Zarówno projektant, jak i wykonawca mogą spełnić wszystkie wymagania formalno-prawne i idące za nimi wymagania techniczne (normy, wytyczne wykonawcze), a mimo to wykonany inżynierski obiekt drogowy może być poważnie uszkodzony jeszcze przed pierwszym obciążeniem użytkowym i w ogóle nie nadawać się do eksploatacji. Świadczy to dobitnie o wadliwości układu wymagań formalno-prawnych. Na układ ten mający źródło w ustawie prawo budowlane składa się ciąg złożony z 4 kolejno od siebie zależnych dokumentów coraz niższego rzędu. Są to:

Rozporządzenie MTiGM w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie [5].

1. Ogólne specyfikacje techniczne – OST.
2. Szczegółowa specyfikacja techniczna – SST.
3. Program zapewnienia jakości – PZJ.

Zależności między tymi dokumentami sprawiają, że OST muszą być zgodne z rozporządzeniem MTiGM, SST musi być zgodna z OST, a PZJ musi być zgodna z SST.

Podejmowane w dalszej kolejności decyzje czysto techniczne, a w szczególności:

- wybór cementu,
- ustalenie składu mieszanki,
- ustalenie technologii betonowania,
- ustalenie technologii pielęgnacji,

są bezpośrednią konsekwencją zapisów z PZJ. Tak więc błąd w treści rozporządzenia MTiGM przenosi się na wszystkie podrzędne dokumentu formalne, a w konsekwencji i na decyzje techniczne.

Wobec największego programu budowlanego, jakim jest program budowy autostrad, najpilniejszą kwestią jest usunięcie z treści wspomnianego rozporządzenia fatalnego zapisu dotyczącego wyboru cementu do budowy inżynierskich obiektów drogowych i wprowadzenie zapisu zwracającego uwagę na konieczność uwzględniania obciążenia ciepłem hydratacji. Pozostawienie tego rozporządzenia w obecnym kształcie skutkować będzie licznymi uszkodzeniami obiektów drogowych i kosztownymi naprawami.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 maja 2004 r. w sprawie sieci autostrad i dróg ekspresowych (Dz. U. z 2004 r. Nr 128, poz. 1334)
- [2] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 13 lutego 2007 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie sieci autostrad i dróg ekspresowych (Dz. U. z 2007 r. Nr 035, poz. 0220)
- [3] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 20 października 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie sieci autostrad i dróg ekspresowych (Dz.U. z 2009 r. Nr 187, poz. 1446).
- [4] Wikipedia – Wolna Encyklopedia http://pl.wikipedia.org/wiki/Autostrady_i_drogi_expresowe_w_Polsce.
- [5] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 63, poz. 735).
- [6] Witakowski P., *Termodynamiczna teoria dojrzewania. Zastosowanie do konstrukcji masywnych z betonu*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1998.
- [7] Witakowski P., *Technologia budowy konstrukcji masywnych z betonu*, XIII Konferencja Naukowa „Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, materiały pokonferencyjne, Korbiewów 2001.
- [8] Witakowski P., *Monitorowanie Stanu Termicznego Konstrukcji Betonowych Podczas Budowy i Dojrzewania*, XIV Konferencja Naukowa „Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, materiały pokonferencyjne, Korbiewów, marzec 2002.
- [9] Witakowski P., *Metoda zdalnego pomiaru wytrzymałości betonu w dojrzewających konstrukcjach betonowych*, XV Konferencja Naukowa „Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, Korbiewów, marzec 2003.
- [10] Witakowski P., *Problem szczelności zbiorników żelbetonowych*, XVI Konferencja Naukowa „Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, Korbiewów 2004.
- [11] Witakowski P., *Wpływ etapowania na naprężenia termiczne w blokach betonowych*, XVI Konferencja Naukowa „Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, Korbiewów 2005.
- [12] Witakowski P., *Wpływ rodzaju cementu na technologię budowy fundamentów mostowych*, XVIII Konferencja Naukowa „Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, Korbiewów 2006.
- [13] Witakowski P., *Zdalne monitorowanie obiektów budowlanych podczas budowy i eksploatacji*, Czasopismo Techniczne, z. 1-Ś/2007, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.
- [14] Saul A.G.A., *Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure*, Magazin of Concrete Research, No. 6, March 1951.
- [15] Rastrup E., *Heat of Hydration in Concrete*, Magazine of Concrete Research, Vol. 6, Nr 17, September 1954.