

Charakter i przyczyny powstawania wczesnych rys termiczno-skurczowych w konstrukcjach betonowych

Dr hab. inż. Barbara Klemczak, mgr inż. Agnieszka Knoppik-Wróbel, Politechnika Śląska

1. Wprowadzenie

Zarysowania konstrukcji betonowych powstające już w fazie ich wznoszenia są częstym zjawiskiem w praktyce budowlanej. Główną przyczyną powstawania tych zarysowań są nierównomierne zmiany objętościowe twardniejącego betonu związane ze wzrostem temperatury betonu oraz z wymianą wilgoci twardniejącego betonu z otoczeniem. Wzrost temperatury betonu wywołany jest egzotermicznym procesem hydratacji cementu. Wskutek wydzielanego w tym procesie ciepła następuje wzrost temperatury betonu. Chłodzenie warstw powierzchniowych konstrukcji oraz stosunkowo niska wartość współczynnika przewodnictwa cieplnego powodują zróżnicowanie temperatur pomiędzy warstwami powierzchniowymi a wnętrzem konstrukcji. Ma to szczególne znaczenie w elementach o znacznej grubości, gdzie różnica temperatur między wnętrzem i powierzchnią elementu może osiągnąć wartość nawet kilkunastu stopni Celsjusza. Jednocześnie w twardniejącym betonie ma miejsce ruch wody spowodowany różnicami w koncentracji wilgoci oraz jej wymianą z otoczeniem. Konsekwencją częściowej utraty wody z betonu, który nie jest materiałem idealnie sztywnym, jest jego zmniejszenie objętości, czyli skurcz. Skurcz betonu jest konsekwencją zachodzących reakcji chemicznych (skurcz che-

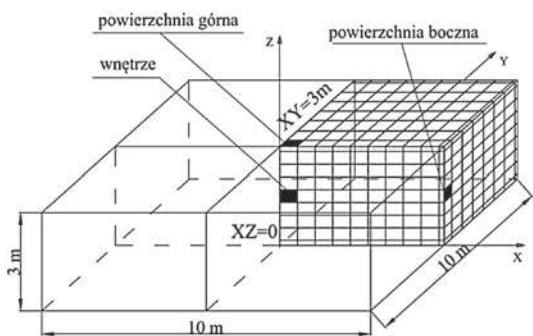
miczny i autogeniczny) oraz utraty wody z betonu przechowywanego w powietrzu nienasyconym parą wodną (skurcz betonu wysychającego).

Konsekwencją nierównomiernych zmian objętościowych twardniejącego betonu jest powstawanie naprężeń termiczno-skurczowych w konstrukcji. Naprężenia te mogą mieć charakter naprężeń własnych oraz naprężeń wymuszonych. Naprężenia własne w tym przypadku powstają wskutek istnienia więzów wewnętrznych konstrukcji, które wynikają z nierównomiernych zmian objętościowych w obrębie elementu. Naprężenia te mogą powstać nawet jeżeli element ma całkowitą swobodę odkształceń. W przypadku elementów o ograniczonej swobodzie odkształceń, zmiany objętościowe generują również naprężenia wymuszone. Omawiane naprężenia własne i wymuszone często osiągają znaczne wartości i mogą być przyczyną powstawania zarysowań i spękań konstrukcji, co ma istotne znaczenie z punktu widzenia trwałości konstrukcji betonowych. Wielkość powstających w twardniejącym betonie naprężeń termiczno-skurczowych zależy od wielu czynników technologiczno-materiałowych, takich jak na przykład warunki betonowania czy skład betonu (czynniki te szerzej omówiono w punkcie 4 artykułu). Istotne znaczenie mają też wymiary, geometria oraz warunki podparcia określające możliwość swobody od-

kształceń elementu betonowego poddanego zmianom objętościowym. Właśnie możliwość swobodnego odkształcania się elementu decyduje o charakterze powstających naprężeń termiczno-skurczowych i typie zarysowań.

W elementach masywnych, takich jak na przykład płyty fundamentowe o znacznych grubościach, dominującą rolę odgrywają naprężenia własne wywołane nierównomiernymi zmianami objętościowymi powstającymi na skutek znacznego zróżnicowania temperatur i wilgotności w obrębie przekroju elementu. Ograniczenie swobody odkształceń takich elementów związane jest z oporem powierzchniowym powstającym w płaszczyźnie styku fundamentu z podłożem gruntowym, w tym przypadku jednak powstające naprężenia wymuszone są stosunkowo niewielkie. Zarysowania takich elementów powstają zwykle w fazie wzrostu temperatury na powierzchniach zewnętrznych elementu (w szczególności na powierzchni górnej), na których generowane są naprężenia rozciągające. Możliwe jest również powstanie rys we wnętrzu elementów w fazie studzenia, kiedy to następuje inwersja bryły naprężeń i we wcześniej ściskanym wnętrzu elementu pojawiają się rozciągania. Doświadczenia jednak wskazują, że rysy wewnętrzne występują znacznie rzadziej [1].

W konstrukcjach o średniej masywności, ale z ograniczoną swobodą odkształceń, takich jak na przy-



Rys. 1.
Wymiary przykładowej masywnej płyty fundamentowej z podziałem na elementy skończone

2. Naprężenia termiczno-skurczowe i zarysowania masywnych płyt fundamentowych

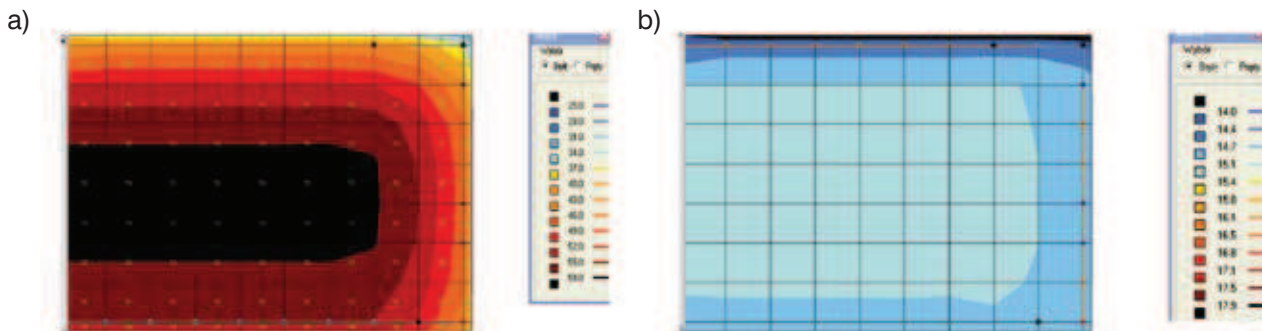
Rozwój w czasie temperatur twardnienia, zmian wilgotności, generowanych naprężeń oraz ewentualnych zarysowań elementów, w których dominujące są naprężenia własne, omówiono na przykładzie płyty fundamentowej o wymiarach podstawy 10 x 10 m i grubości 3 m. Założono, że płyta została wykonana z mieszanki betonowej o następującym składzie: cement CEMII/BS 32,5R – 350 kg/m³, woda – 175 l/m³, kruszywo – 1814 kg/m³. Płyta jest zbrojona siatkami powierzchniowymi z prętów o średnicy 12 mm w rozstawie 20 cm x 20 cm (stal RB400). Przyjęto, że temperatura zewnętrzna, jak również temperatura początkowa mieszanki betonowej wynosiła 25°C. Założono też, że powierzchnia górna jest odkryta przez cały analizowany okres 20 dni, natomiast na powierzchniach bocznych utrzymywane jest deskowanie. Symetria zagadnienia pozwala na ograniczenie analizy do ¼ elementu (rys. 1). W dalszej części rozkładu temperatury, wilgotności oraz naprężeń przedstawiono dla płaszczyzny środkowej płyty XZ=0, natomiast obszary zarysowań dla górnej powierzchni płyty XY=3 m (rys. 1). Rysunek 2a przedstawia rozkład temperatur twardnienia po 6,5 dobach od zabetonowania elementu w płaszczyźnie środkowej pły-

kładu ściany żelbetonowej, istotne znaczenie mają naprężenia wymuszone wywołane oporem liniowym w miejscu połączenia ściany z wcześniej wykonanym fundamentem. W takich elementach obserwuje się głównie rysy pionowe, rozpoczynające się nad stykiem ściany z fundamentem i zanikające w górnej części ściany. W pobliżu brzegów ściany obserwuje się odchylenie rys od pionu ku krawędziom bocznym [2, 3].

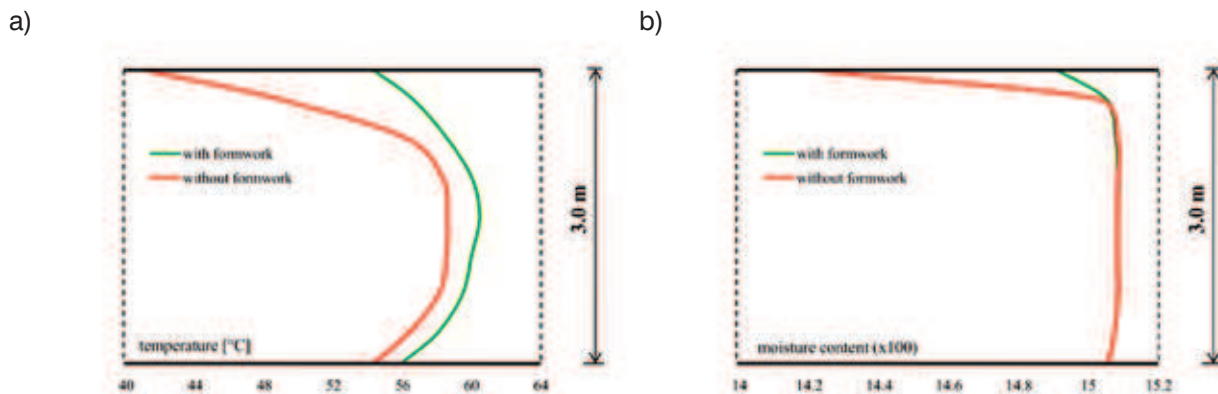
W dalszej części artykułu omówiono charakter zmian termiczno-wilgotnościowych i powstających naprężeń oraz charakter zarysowań w masywnych płytach fundamentowych i w ścianach żelbetonowych. Przedstawiono również główne czynniki technologiczno-materiałowe wpływające na zwiększenie ryzyka zarysowania we wczesnym okresie dojrzwania betonu, jak również metody ograniczania tego ryzyka.

Analizy numeryczne ilustrujące omawiane zagadnienie wykonano programami TEMWIL, MAFEM_VEVP oraz MAFEM3D [4, 5, 6].

Model obliczeniowy zastosowany w programach zalicza się do grupy modeli fenomenologicznych i umożliwia kompleksową analizę konstrukcji betonowych poddanych wpływom termiczno-skurczowym w początkowym okresie dojrzwania betonu. W modelu założono rozdzielanie pól termiczno-wilgotnościowych i mechanicznych. Przy wyznaczaniu pól termiczno-wilgotnościowych przyjęto pełne sprzężenie pól termicznych i wilgotnościowych (program TEMWIL). Określone w czasie i przestrzeni zmiany temperatury i wilgotności twardniejącego betonu są podstawą do obliczenia odkształceń termiczno-skurczowych. Stan naprężenia określany jest przy założeniu, że odkształcenia te mają charakter dystorsyjny. Do wyznaczenia stanu naprężenia w konstrukcji masywnej opracowano lepkosprężysto-lepkoplastyczny model materiałowy twardniejącego betonu (program MAFEM_VEVP). Prezentację wyników obliczeń umożliwia program MAFEM3D.



Rys. 2. a) Przykładowy rozkład temperatur (°C): płaszczyzna XZ=0, 6,5 dnia dojrzwania betonu, b) Przykładowy rozkład wilgotności (x100, m³/m³): płaszczyzna XZ=0, 6,5 dnia dojrzwania betonu



Rys. 3. a) Rozkład temperatur wzdłuż osi pionowej elementu, b) Rozkład wilgotności wzdłuż osi pionowej elementu

ty $XZ=0$, natomiast rysunek 3a pokazuje rozkład temperatur wzdłuż osi pionowej elementu. Brak symetrii tego rozkładu wynika ze zróżnicowanych warunków brzegowych zadanych dla powierzchni górnej (powierzchnia odkryta) i powierzchni dolnej (kontakt z gruntem). Na obydwu rysunkach widoczne są znaczne różnice pomiędzy temperaturą wnętrza płyty i temperaturą jej powierzchni, dla zadanych warunków betonowania jest to blisko 25°C . Korzystny wpływ zastosowania izolacji termicznej na górnej powierzchni płyty, zmniejszający znacznie różnicę

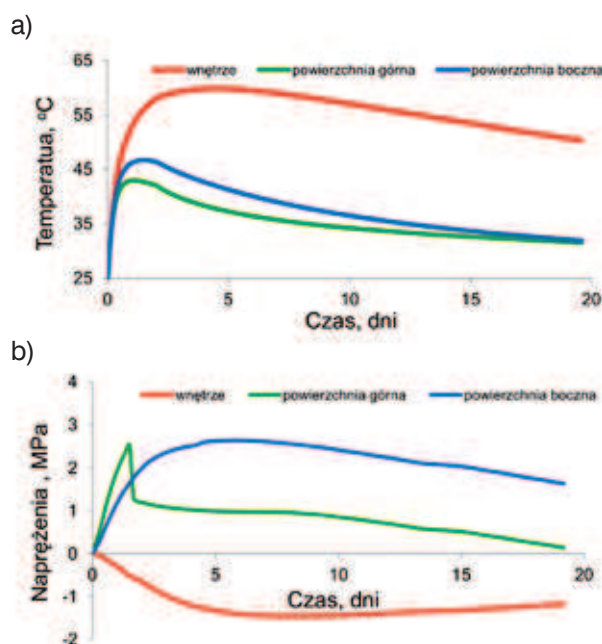
temperatur wnętrze-powierzchnia, widoczny jest na rysunku 3a. Rozkład wilgotności w 6,5 dobie po zabetonowaniu dla przekroju płyty betonowanej $XZ=0$ przedstawiono na rysunku 2b, a rozkład wilgotności wzdłuż osi pionowej elementu na rysunku 3b. Na rysunkach tych widać wyraźnie, że zmiany wilgotności w masywnym elemencie zachodzą głównie w strefach przypowierzchniowych.

Nieliniowe i niestacjonarne pola temperatur i wilgotności istniejące w płycie fundamentowej są przyczyną powstawania naprężeń. Dominujące w przypadku takich konstrukcji

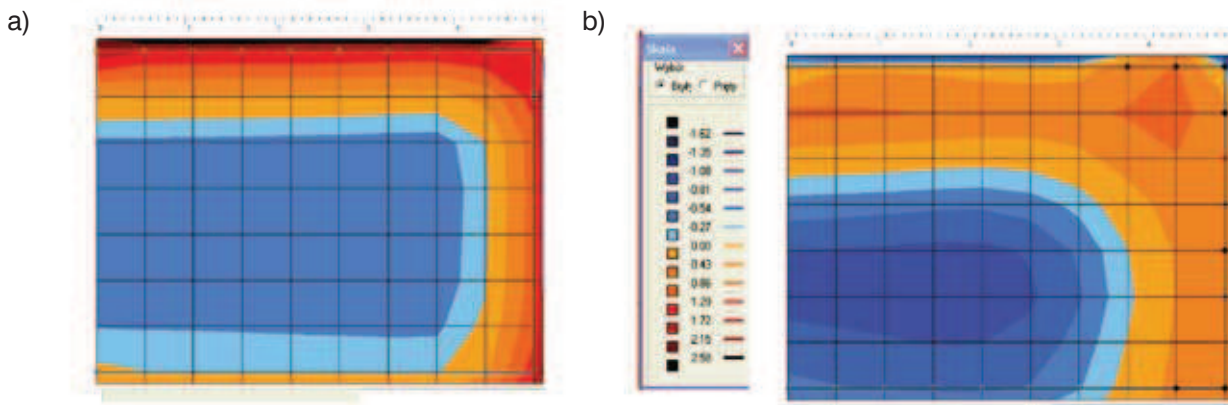
są naprężenia własne wywołane nierównomiernymi zmianami objętościowymi powstającymi na skutek znacznego zróżnicowania temperatur i wilgotności w obrębie przekroju elementu i tworzeniem się więzów wewnętrznych w konstrukcji. Naprężenia wymuszone wywołane oporem powierzchniowym powstającym w płaszczyźnie styku fundamentu z podłożem gruntowym odgrywają w tym przypadku znacznie mniejszą rolę.

Charakterystyczny jest rozkład naprężeń termiczno-skurczowych w przekroju elementu oraz ich zmienność w czasie twardnienia. W fazie wzrostu temperatury powstają naprężenia rozciągające w warstwach powierzchniowych płyty oraz naprężenia ściskające we wnętrzu płyty (rys. 4). W fazie studzenia następuje inwersja bryły naprężeń: na powierzchniach płyty obserwowane są ściskania, we wnętrzu pojawiają się naprężenia rozciągające. W przykładowej, analizowanej płycie fundamentowej widoczne są naprężenia ściskające, które pojawiły się na górnej powierzchni płyty w fazie studzenia (rys. 5). Ze względu jednak na okres tylko 20 dni uwzględnionych w analizie, nie jest widoczna pełna inwersja bryły naprężeń we wnętrzu płyty (rys. 5).

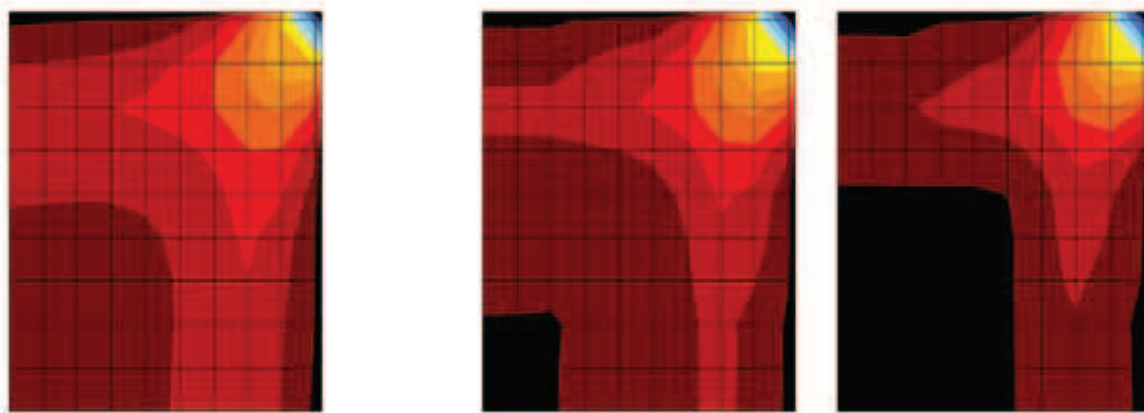
W elementach masywnych, takich jak przedstawiana przykładowa płyta fundamentowa, rysy zwykle obserwowane są na górnych powierzchniach. Stosownie do przed-



Rys. 4. Rozwój w czasie temperatur i naprężeń w wybranych punktach płyty fundamentowej



Rys. 5. Rozkład naprężeń w przekroju środkowym płyty ($XZ=0$): a) faza rozgrzewu, b) faza studzenia



Rys. 6. Rozwój obszarów zarysowanych (czarny kolor) w czasie na $\frac{1}{4}$ powierzchni górnej płyty

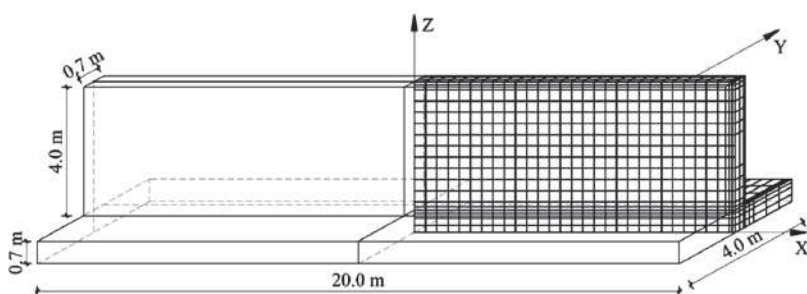
stawionego wcześniej rozwoju i charakteru powstających naprężeń (rys. 4 i 5), ewentualne zarysowania pojawiają się w fazie wzrostu temperatury, a więc w ciągu pierwszych kilku dni po zabetonowaniu elementu. Pierwsze rysy mogą pojawić się na krawędzi oraz w centralnej części powierzchni górnej płyty, później następuje zwiększenie obszaru zarysowanego, przede wszystkim w części centralnej powierzchni górnej. Powstaniu zarysowań towarzyszy spadek naprężeń (rys. 4). Możliwe obszary zarysowań dla $\frac{1}{4}$ powierzchni górnej płyty oraz ich rozwój pokazano na rysunku 6. Należy również zaznaczyć, że w związku z powstającymi w fazie studzenia naprężeniami rozciągającymi, również we wnętrzu płyty mogą wystąpić zarysowania [7]. Ponieważ powstają one w znacznie późniejszym okresie, kiedy wytrzyma-

łość betonu jest znacznie większa, prawdopodobieństwo wystąpienia rysy wewnątrz masywnych płyt jest znacznie mniejsze niż na powierzchni [1].

3. Naprężenia termiczno-skurczowe i zarysowania ścian żelbetowych

W przypadku elementów pozbawionych swobody odkształceń, charakter powstających naprężeń oraz ewentualnych zarysowań jest odmienny w stosunku do omawianej wcześniej płyty fundamentowej. Ten odmienny charakter naprężeń i zarysowań jest związany z dominującą rolą naprężeń wymuszonych wywołanych ograniczeniem swobody odkształceń elementu. Dobrym przykładem takiego elementu jest ściana żelbetowa, w której główną przyczyną powstania naprężeń wymuszonych jest opór li-

niowy w miejscu połączenia ściany z wcześniej wykonanym fundamentem. Należy zaznaczyć, że w elementach pozbawionych swobody odkształceń pojawiają się również naprężenia własne wywołane nierównomiernym rozkładem temperatur i wilgotności. Jednak o ile w elementach masywnych osiągają one znaczne wartości i mają dominujące znaczenie, w ścianach ich wpływ jest znacznie mniejszy. Wynika to bezpośrednio z rozkładu temperatur twardnienia i zmian wilgotności betonu w przekroju ściany. Chociaż różnice w wartościach temperatur pomiędzy powierzchnią ściany a jej wnętrzem są obserwowane, to są one znacznie mniejsze. Podobnie jak w poprzednim rozdziale, omawiane zagadnienia zilustrowano przykładem obliczeniowym, który przedstawia rozwój w czasie temperatur twardnienia, zmian wilgotności, generowanych



Rys. 7. Wymiary przykładowej ściany żelbetowej z podziałem na elementy skończone

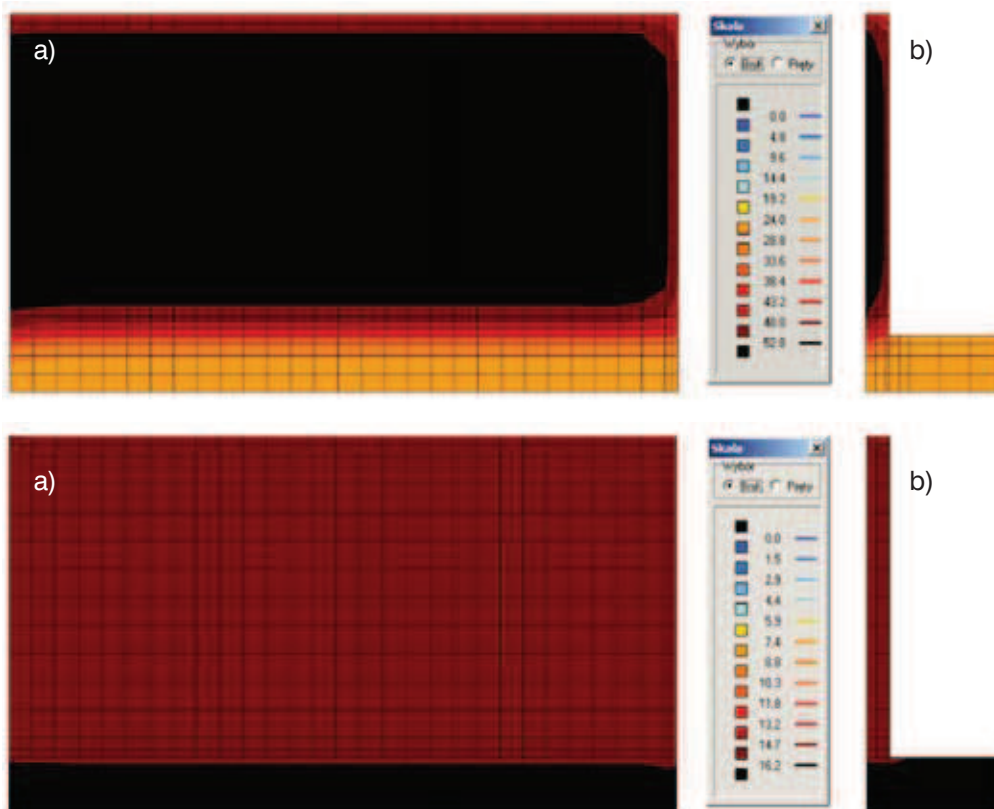
naprężeń oraz ewentualnych zarysowań ściany żelbetowej. Przyjęto, że przykładowa ściana żelbetowa o długości 20 m, wysokości 4 m i grubości 70 cm została wykonana na wcześniej betonowanym fundamencie grubości 70 cm i szerokości 4 m (rys. 7). Uwzględniono zbrojenie ściany w postaci siatki powierzchniowej z prętów $\varnothing 16$ w rozstawie poziomym 20 cm i pionowym 15 cm oraz zbrojenie fundamentu w postaci siatki prętów o oczkach 20 cm x 20 cm (stal RB400). Beton ściany, jak i fundamentu przyjęto o klasie C25/30 z wykorzystaniem cementu CEM

I 32.5R w ilości 450 kg/m³. Założono również, że temperatura zewnętrzna, jak również temperatura początkowa mieszanki betonowej wynosiła 25°C, a na powierzchniach bocznych przez cały analizowany okres 20 dni utrzymywane jest deskowanie. Podobnie jak w przypadku płyty fundamentowej, symetria zagadnienia pozwala na ograniczenie analizy do ¼ elementu (rys. 7).

Przykładowy rozkład temperatur i wilgotności w analizowanej ścianie po 2 dniach dojrzewania betonu przedstawiono na rysunkach 8 i 9. Ze względu na stosunko-

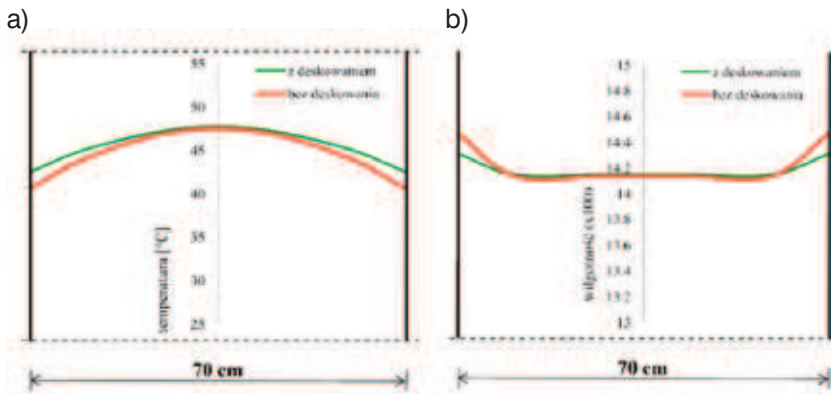
wo małą grubość elementu, różnica temperatury między wnętrzem a powierzchnią jest stosunkowo niewielka i nie przekracza dla założonych warunków dojrzewania betonu 10°C (rys. 8b i 10a). Zmiany wilgotności w analizowanej ścianie, podobnie jak w masywnej płycie fundamentowej, zachodzą głównie w strefach przypowierzchniowych (rys. 9 i 10b).

Wzrost temperatury betonu następuje w krótkim okresie od zabetonowania ściany. Przez okres około 1÷3 dni ściana rozszerza się pod wpływem ciepła hydratacji cementu napotykając na opór wcześniejszego wykonanego i wystudzonego fundamentu (rys. 11). Towarzyszy temu powstanie w ścianie naprężeń ściskających, a w fundamencie naprężeń rozciągających (rys. 11 i 12). Po osiągnięciu temperatury maksymalnej rozpoczyna się faza studzenia ściany (rys. 11). W fazie studzenia obserwowana jest inwersja bryły naprężeń. Następuje wtedy szybki spadek naprężeń ściskających, a później pojawiają się naprężenia rozciągające (rys. 11 i 13). Naprężenia roz-

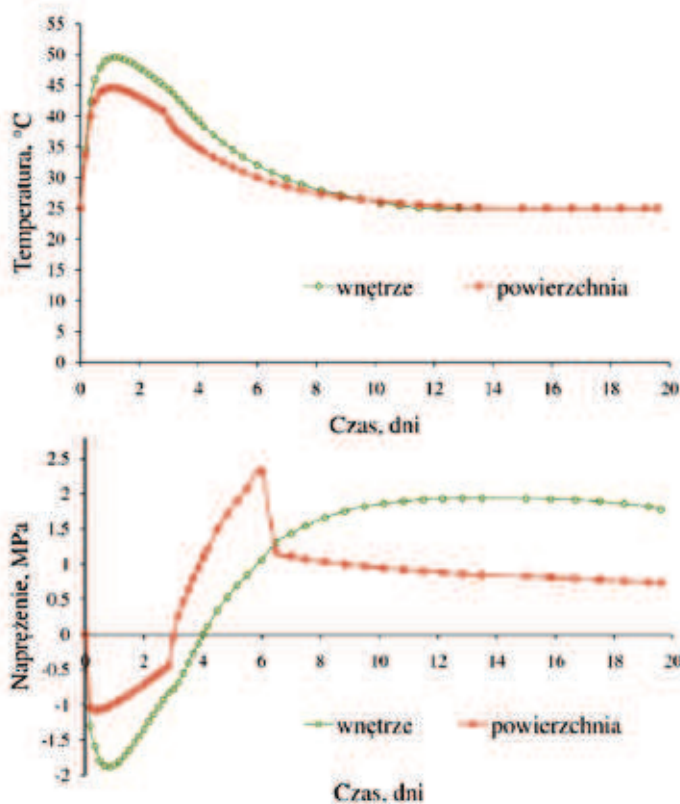


Rys. 8. Przykładowy rozkład temperatur (°C) po 1,5 dnia dojrzewania betonu:
a) przekrój podłużny $XZ=0$,
b) przekrój poprzeczny $YZ=0$

Rys. 9. Przykładowy rozkład wilgotności ($\times 100$, m³/m³) po 1,5 dnia dojrzewania betonu:
a) przekrój podłużny $XZ=0$,
b) przekrój poprzeczny $YZ=0$



Rys. 10. Przykładowy rozkład temperatur (°C) i wilgotności (m³/m³) na grubości ściany



Rys. 11. Rozwój w czasie temperatur i naprężeń w wybranych punktach ściany

ciągające mogą osiągnąć stosunkowo duże wartości i doprowadzić do powstania zarysowań.

Charakterystyczny obraz rys w ścianach żelbetowych wywołany omawianymi wpływami przedstawiono na rysunku 14. Są to głównie rysy pionowe, rozpoczynające się nad stykiem ściany z fundamentem i zanikające w górnej części ściany. Odchylenie rys od pionu ku krawędziom bocznym obserwowane jest w pobliżu brzegów ściany (rys. 14). Zasięg rys obejmuje

je 1/3, 1/2, a nawet 2/3 wysokości ściany, a ich rozstaw najczęściej wynosi 1,5÷3,0 m [2, 3]. W przypadku wczesnego rozdeskowania, pierwsze rysy pojawiają się na powierzchniach zewnętrznych ściany (rys. 15b). Przy utrzymywaniu ściany w deskowaniu przez dłuższy czas pierwsze rysy pojawiają się w podobnym czasie, jednak w takim przypadku swój początek mają we wnętrzu ściany (rys. 16b). Należy zaznaczyć, że w obu przypadkach rysy te mogą się po-

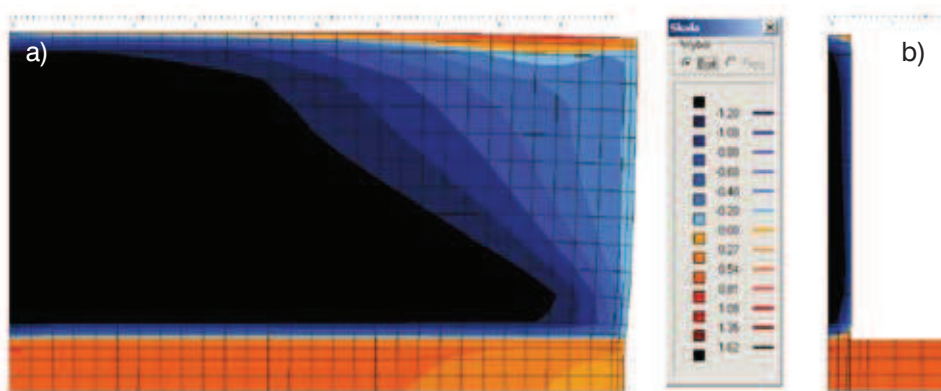
większać i objąć swoim zasięgiem cały przekrój ściany. Takie skośne rysy są szczególnie niepożądane w ścianach zbiorników na ciecz, ponieważ czynią je nieszczelnymi.

4. Czynniki wpływające na ryzyko zarysowania

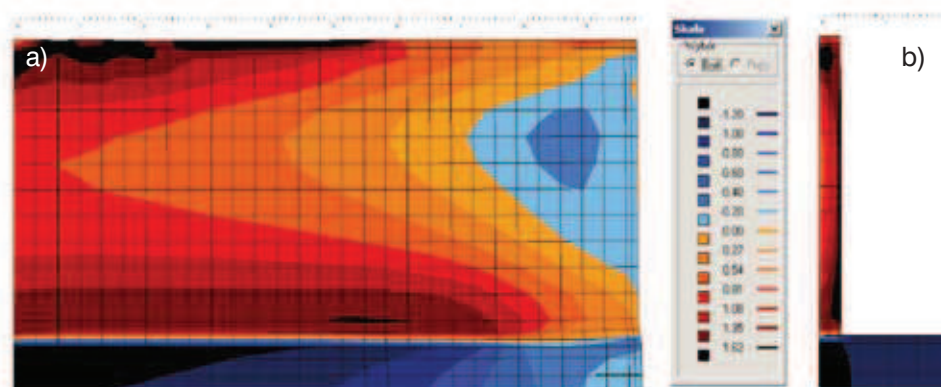
Podejmowane środki zaradcze ograniczające ryzyko zarysowania, to przede wszystkim zabiegi technologiczne mające na celu obniżenie temperatur twardnienia oraz zmniejszenie różnic temperatur pomiędzy wnętrzem i powierzchnią elementu [9, 10, 11, 12]. Wartości temperatur twardnienia i ich rozkład w elemencie są kształtowane przez:

- ilość i rodzaj zastosowanego cementu,
- termiczne właściwości betonu, takie jak: przewodność i pojemność cieplna betonu,
- warunki prowadzenia robót betonowych, takie jak: temperatura początkowa betonu, zastosowanie izolacji termicznej, chłodzenia wewnętrznego czy też betonowania etapowego,
- warunki środowiskowe, takie jak: temperatura i wilgotność otoczenia oraz siła wiatru,
- wymiary i proporcje geometryczne elementu.

Potencjalne metody zmniejszania temperatur twardnienia betonu odnoszą się bezpośrednio do czynników wymienionych wyżej. Za najprostszą i najbardziej skuteczną metodą uważa się właściwy dobór składników mieszanki betonowej. Stosowane są więc cementy o niskim ciepłe uwodnienia, ogranicza się również zawartość cementu w mieszance. Sugerowane jest też stosowanie kruszywa granitowego lub bazaltowego. Istotną rolę odgrywają warunki prowadzenia robót betonowych oraz warunki środowiskowe, takie jak: temperatura początkowa mieszanki betonowej, temperatura otoczenia oraz wzajemna korelacja tych temperatur. Generalnie, za korzystne warunki betonowania



Rys. 12.
Rozkład naprężeń ścisających powstających w ścianie w fazie rozgrzewu: a) przekrój podłużny $XZ=0$, b) przekrój poprzeczny $YZ=3\text{ m}$



Rys. 13.
Rozkład naprężeń rozciągających powstających w ścianie w fazie studzenia: a) przekrój podłużny $XZ=0$, b) przekrój poprzeczny $YZ=3\text{ m}$

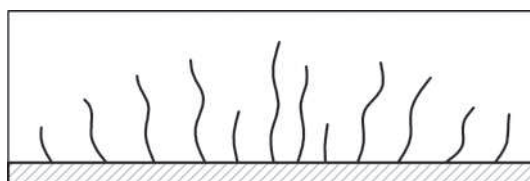
konstrukcji masywnych uważa się niską, ale dodatnią temperaturę otoczenia oraz obniżanie temperatury początkowej mieszanki betonowej w stosunku do temperatury otoczenia [1, 7, 13]. Najczęściej temperaturę mieszanki betonowej obniża się poprzez oziębianie kruszywa i wody zarobowej. Obniżenie temperatury kruszywa uzyskuje się poprzez spryskiwanie zimną wodą, kruszywo drobne może być również chłodzone powietrzem. Schłodzenie wody zarobowej można uzyskać zastępując jej część kruszonym lodem lub płatkami lodu [14]. Znacznie rzadziej stosowane jest chłodzenie gotowej mieszanki betonowej ciekłym azotem o temperaturze -196°C , ze względu na wysokie koszty tej technologii [14].

W trakcie prowadzenia robót betonowych można zastosować takie metody ograniczające generowane temperatury twardnienia, jak: betonowanie etapowe, chłodzenie wewnętrzne czy też ułożenie izolacji termicznej. W betonowaniu etapowym możliwe jest układanie betonu blokami lub warstwa-

mi czy też połączenie tych dwóch technologii [1]. Metoda ta pozwala na ograniczenie temperatur twardnienia, jednak stwarza ryzyko powstania rys w miejscu połączeń poszczególnych fragmentów konstrukcji betonowanych w różnym czasie. Inną metodą jest stosowanie chłodzenia wewnętrznego betonu w postaci systemu rur z przepływającą wodą. Ta metoda z kolei wymaga zaprojektowania układu rur i odpowiedniego dobrania takich parametrów, jak: temperatura i prędkość wody przepływającej w rurach oraz długości okresu chłodzenia. Dodać należy, że metoda ta jest uważana za stosunkowo drogą ze względu na koszt wykonania instalacji chłodzącej, natomiast jej niewątpliwą zaletą jest obniżenie zarówno temperatury wnętrza, jak i różnic tempera-

tury wnętrze-powierzchnia. Znaczne zmniejszenie różnic temperatur między wnętrzem i powierzchnią można uzyskać układając izolację termiczną na powierzchniach elementu [15, 16]. Izolacja termiczna ogranicza odprowadzenie ciepła i wilgoci z elementu zmniejszając różnice temperatur, ale jednocześnie powoduje wzrost temperatury wnętrza (rys. 3). Wadą tej metody jest konieczność stosunkowo długiego okresu utrzymywania izolacji na powierzchniach elementu, ponieważ zbyt wczesne jej usunięcie może spowodować powstanie w elemencie jeszcze większych naprężeń niż w przypadku braku izolacji.

Podsumowując metody ograniczania niekorzystnych wpływów termicznych w konstrukcjach należy podkreślić, że ich celem jest



Rys. 14.
Typowy obraz zarysowań powstających w ścianach żelbetonowych [8]

przede wszystkim zmniejszenie różnic temperatur pomiędzy wnętrzem i powierzchnią elementu. Większość zaleceń w tym zakresie sugeruje, aby różnica ta nie przekraczała $15 \div 20^\circ\text{C}$ [7, 9, 10, 11, 12, 14]. Dodatkowo zaleca się również ograniczanie temperatury maksymalnej, która generowana jest w procesie twardnienia, do 65°C . Ograniczenie temperatury maksymalnej wynika z niekorzystnego wpływu wysokiej temperatury betonu na jego późniejsze właściwości mechaniczne. Podaje się, że 28-dniowa wytrzymałość betonu poddanego wpływom wysokiej temperatury przez okres $1 \div 3$ pierwszych dni dojrzewania może być obniżona nawet o $10 \div 20\%$. Należy podkreślić, że zalecenia te odnoszą się głównie do elementów masywnych, gdzie dominujące są naprężenia własne generowane przez różnice temperatur między wnętrzem i powierzchnią elementu. W przypadku konstrukcji o ograniczonej swobodzie odkształceń, takich jak przedstawiana w artykule ściana żelbetowa,

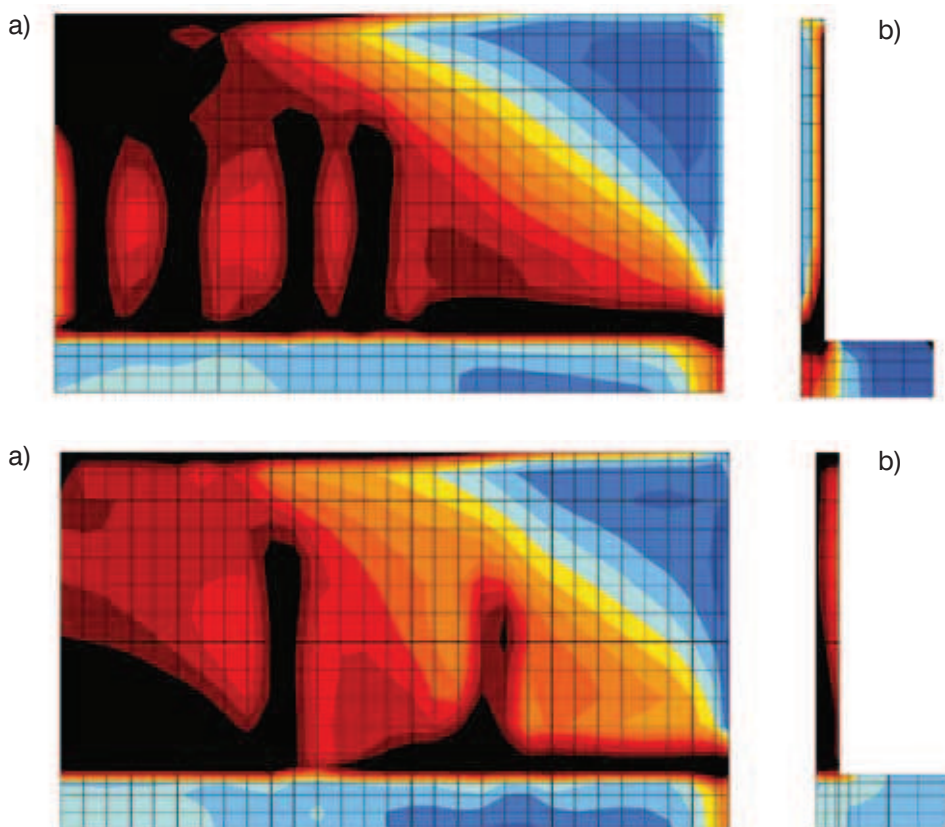
różnica temperatur między wnętrzem a powierzchnią nie jest decydującym czynnikiem wpływającym na ryzyko zarysowania. Istotne znaczenie ma w tym przypadku poziom temperatury maksymalnej i stopień utwardzenia ściany w fundamencie.

Zmiany objętościowe twardniejącego betonu są również związane z utratą wody. Pierwsze zmiany objętościowe tego typu zachodzą, gdy beton jest jeszcze w stanie plastycznym. Kontrakcja taka, nazywana skurczem plastycznym, spowodowana jest głównie parowaniem wody z powierzchni betonu. Niekorzystny wpływ skurczu plastycznego na beton i ewentualne rysy na powierzchni są eliminowane przez zabezpieczenie powierzchni betonu przed parowaniem bezpośrednio po zabetonowaniu. Zmiany objętościowe betonu zachodzące po jego związaniu są konsekwencją zachodzących reakcji chemicznych procesu hydratacji (skurcz chemiczny i autogeniczny) oraz utraty wody z betonu przechowywanego w powietrzu

nienasyconym parą wodną (skurcz betonu wysychającego). Metody ograniczające te wpływy związane są przede wszystkim z właściwą pielęgnacją betonu zabezpieczającą przed utratą wody z powierzchni betonu. Stosowane są tutaj natryski wodą czy też przykrycie powierzchni betonu folią.

5. Podsumowanie

W artykule omówiono charakter oraz przyczyny występowania wczesnych rys i spękań w masywnych płytach fundamentowych oraz w ścianach żelbetowych. Wyniki analiz przedstawionych w artykule miały na celu przybliżenie poruszanego problemu. Analizy te zostały wykonane dla konkretnych, zadanych warunków twardnienia betonu i stanowią jakościową ilustrację zagadnienia. Bezpośrednią przyczyną wczesnych rys termiczno-skurczowych są przede wszystkim oddziaływania pośrednie, związane ze zmianami temperatury i wilgotności twardniejącego betonu. Przedsta-



Rys. 15.

Obszar zarysowań ściany (czarny kolor) – deskowanie ściany usunięte w 3 dobie po zabetonowaniu:
a) przekrój podłużny $XZ=0,35$, powierzchnia,
b) przekrój poprzeczny $YZ=3$ m

Rys. 16.

Obszar zarysowań ściany (czarny kolor) – ściana z deskowaniem w całym okresie analizy:
a) przekrój podłużny $XZ=0,35$, powierzchnia,
b) przekrój poprzeczny $YZ=3$ m

wiany problem nabiera szczególnego znaczenia wobec wzrastających w ostatnich latach wymagań dotyczących trwałości i jakości konstrukcji, a także wymagań inwestorów, niejednokrotnie narzucających konieczność betonowania dużych elementów w krótkim terminie i przy niekorzystnych warunkach pogodowych [16, 17]. Należy pamiętać, że w masywnych płytach fundamentowych wczesne rysy termiczno-skurczowe mogą inicjować korozję zbrojenia, a w późniejszym okresie powiększać się pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych.

Coraz częściej też obserwowane są uszkodzenia pochodzenia termiczno-skurczowego w konstrukcjach średniomasywnych o ograniczonej swobodzie odkształceń, wykonanych z betonów o znacznej zawartości cementu. W praktyce budowlanej częstym przypadkiem są termiczno-skurczowe zarysowania ścian żelbetonowych nad ich stykiem z wcześniej wykonanymi fundamentami. Problem ten dotyczy między innymi ścian przyczółków mostowych [2] czy też ścian zbiorników na cieczę [3, 8], w których to zarysowania są szczególnie niepożądane wobec wymagań szczelności.

Ocena ryzyka wystąpienia rys termiczno-skurczowych w konstrukcjach masywnych jest zadaniem trudnym ze względu na znaczną liczbę czynników decydujących o wielkości i charakterze wczesnych zmian objętościowych. Istotne znaczenie mają w tym przypadku doświadczenia zebrane w trakcie realizacji konstrukcji masywnych [1,

2, 7, 16, 17], które pozwoliły na wypracowanie praktycznych środków zaradczych zmniejszających ryzyko zarysowania. Równie ważna jest też znajomość przyczyn i charakteru wczesnych wpływów termiczno-skurczowych powstających w trakcie dojrzewania betonu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kiernożycki W., Betonowe konstrukcje masywne. Polski Cement, Kraków 2003
 [2] Flaga K., Furtak K., Problem of thermal and shrinkage cracking in tanks vertical walls and retaining walls near their contact with solid foundation slabs. *Architecture-Civil Engineering-Environment*, Vol. 2, nr 2/2009, s. 23–30
 [3] Zych M., Analiza pracy ścian zbiorników żelbetonowych we wczesnym okresie dojrzewania betonu, w aspekcie ich wodoszczelności”, Praca doktorska, 2011, Wydział Inżynierii Łądowej Politechniki Krakowskiej
 [4] Klemczak B., Modelowanie efektów termiczno-wilgotnościowych i mechanicznych w betonowych konstrukcjach masywnych. Monografia 183, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008
 [5] Klemczak B., The influence of thermom-diffusion cross effect on the temperature and moisture distribution in early age mass concrete. *Architecture-Civil Engineering-Environment*, Vol. 3, nr 3/2010, s. 55–62
 [6] Klemczak B., Prediction of Coupled Heat and Moisture Transfer in Early-Age Massive Concrete Structures. *Numerical Heat Transfer. Part A: Applications*, Vol. 60, nr 3/2011, s. 212–233
 [7] Witakowski P., Termodynamiczna teoria dojrzewania, zastosowanie do konstrukcji masywnych z betonu. *Prace Naukowe Politechniki Krakowskiej*, 1998
 [8] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., Głuszak B., Destrukcja termiczna zbiorników żelbetonowych we wczesnym okresie dojrzewania. XXXIX Konferencja Naukowa KLIW PAN i KN PZITB Krynica 1993, tom 5, s. 5–12
 [9] ACI Committee No 207, Mass Concrete for Dams and other Massive Concrete Structures, *ACI Journal*, 1970

[10] RILEM TC 119-TCE, Avoidance of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. *Materials and Structures*, V. 30, October 1997, s. 451–464

[11] RILEM REPORT 25, Early Age Cracking in Cementitious Systems. Final Report of RILEM Technical Committee TC 181-EAS, 2002

[12] Mihashi H., Leite J. P., State-of-the-Art Report on Control Cracking in Early Age Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 2, nr 2/2004, s. 141–154

[13] Klemczak B., O wpływie warunków prowadzenia robót betonowych na temperatury twardnienia betonu w konstrukcjach masywnych. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 4/2006, s. 203–205

[14] Neville A. M., Właściwości betonu. *Polski Cement*, Kraków 2000

[15] ACI Committee No 207, Cooling and Insulation Systems for Massive Concrete, *Concrete International (ACI)*, 1980

[16] Czkwianianc A., Pawlica J., Mačkowiak Z., Saferna M., Betonowanie masywnego fundamentu o objętości 7400 m³. Konferencja Dni Betonu, Polski Cement, Szczyrk, 8–10 październik 2002, s. 607–618

[17] Ajdukiewicz A., Broł J., Kliszczewicz A., Węglorz M., Problemy projektowania i nadzoru technologicznego nad realizacją wielkiej płyty fundamentowej. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 1/2007, s. 3–9

[18] Klemczak B., Knoppik-Wróbel A., Early age thermal and shrinkage cracks in concrete structures – description of the problem, *Architecture-Civil Engineering-Environment*, Vol. 4, nr 2/2011, s. 35–48

Artykuł został przygotowany w ramach projektu N N506 043440 pt. „Numeryczna ocena ryzyka zarysowania i metod jego ograniczenia w konstrukcjach masywnych i średniomasywnych”, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Zagadnienia prezentowane w artykule w szerszym zakresie zostały przedstawione w numerze 2/2011 czasopisma ACEE [18].

Do Członków Dolnośląskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa.

Szanowni Państwo!

Uprzejmie informujemy, że DOIIB zamówiła dla swoich członków prenumeratę miesięcznika „Przegląd Budowlany” tylko do kwietnia 2012 roku. Na pozostałą część roku mogą Państwo zaprenumerować nasz miesięcznik bezpośrednio w redakcji.

Dla Członków DOIIB koszt prenumeraty od maja do grudnia 2012 roku to 71,40 zł brutto (w tym 5% VAT).

Płatności należy dokonać na: PZITB ZG Wydawnictwo Przegląd Budowlany, ul. Świętokrzyska 14, 00-050 Warszawa, nr konta: 90 1160 2202 0000 0000 5515 6488.

Prenumeratę można również zamówić dzwoniąc na numer: (22) 826 67 00; (22) 828 27 20

lub pisząc na e-mail: zapasnik@przegladbudowlany.pl

Wystarczy podać dane wysyłkowe i dokonać płatności, aby zapewnić sobie kontynuację prenumeraty „Przeglądu Budowlanego”.

Serdecznie zapraszamy!