

**XXIV**XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009**awarie budowlane**Prof. dr inż. ANDRZEJ AJDUKIEWICZ, *andrzej.ajdukiewicz@polsl.pl*Dr inż. JACEK HULIMKA, *jacek.hulimka@polsl.pl*Dr inż. RAFAŁ KRZYWOŃ, *rafal.krzywon@polsl.pl*

Katedra Inżynierii Budowlanej, Politechnika Śląska

ZAGROŻENIA JAKOŚCI BETONU W KONSTRUKCJI WSKUTEK ODDZIAŁYWAŃ DYNAMICZNYCH W SĄSIEDZTWIE

RISK OF THE QUALITY OF CONCRETE IN STRUCTURE DUE TO DYNAMIC ACTIONS AT THE NEIGHBOURHOOD

Streszczenie W referacie opisano problemy, które pojawiły się w trakcie budowy jednego z osiedli mieszkaniowych w Katowicach. Betonowaniu stropów i ścian dwunastokondygnacyjnego budynku towarzyszyło zagęszczanie podłoża w sąsiedztwie metodą konsolidacji dynamicznej. Obawy o wpływ drgań na warunki dojrzewania betonu skłoniły inwestora do zlecenia autorom referatu ekspertyzy, mającej określić stan już wykonanej konstrukcji oraz zdefiniować warunki prowadzenia prac w przyszłości. Przeprowadzone badania mikroskopowe nie wykazały widocznych uszkodzeń struktury betonu, jednakże jego wytrzymałość znacznie odbiegała od oczekiwanej. Przyczyną niskiej wytrzymałości okazało się spowolnienie procesu wiązania mieszanki, wynikające z jej składu, a spotęgowane niską temperaturą.

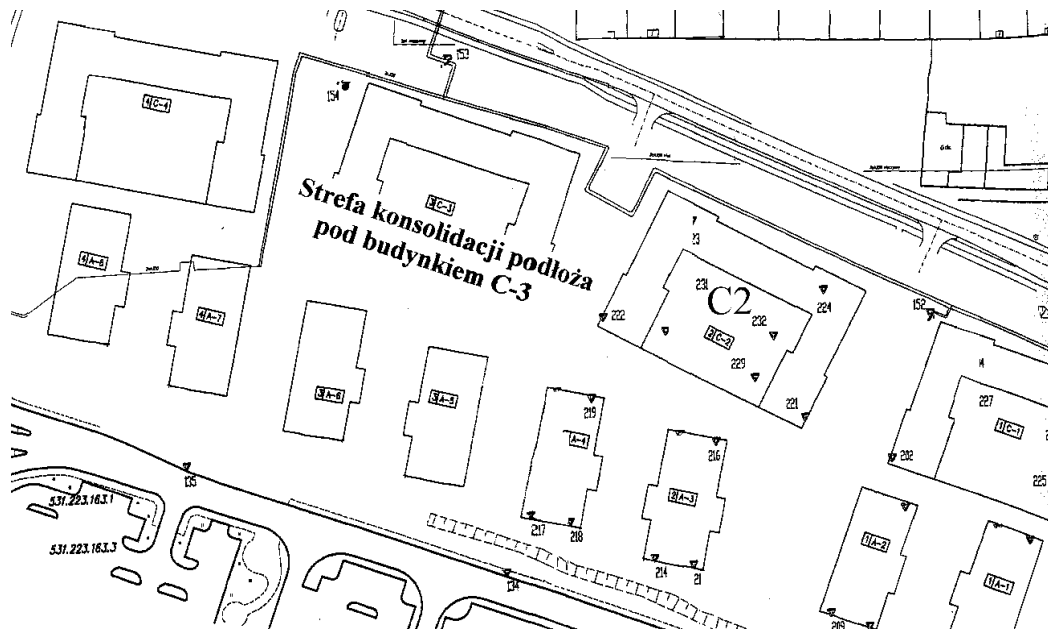
Abstract Paper describes problems found during the erection of the housing estate in Katowice. Concreting of the slabs and walls of twelve storey building was accompanied by the dynamic compaction of the ground in the neighborhood. Because of the fears for the concrete curing conditions investor decided to ask the authors of this paper for the expert's opinion about the condition of realized structure and for defining the synchronization possibilities of construction works in the future. Microscopic investigations did not show any visible damages of concrete structure, but tested concrete strength considerably differed from required. The reason of observed underrate strength was the reduction of setting speed of the concrete mixture caused by its unfavorable composition and intensified by curing in low temperature.

1. Wstęp

Tempo współczesnych inwestycji budowlanych niejednokrotnie zmusza wykonawców do jednoczesnego prowadzenia robót na kilku frontach. Stąd, oddziaływania spowodowane niektórymi rodzajami prac, mogą niekorzystnie wpływać na poprawność technologii procesów prowadzonych w sąsiedztwie. Z takim problemem zetknęli się autorzy niniejszego referatu na budowie zespołu mieszkaniowego w Katowicach. Dotyczył on w szczególności wpływu dynamicznej konsolidacji podłoża pod budynek C3 na wytrzymałość i strukturę betonu w stropach i ścianach sąsiadującego z nim budynku C2 (rys. 1).

Budowane osiedle znajduje się w granicach likwidowanej kopalni węgla kamiennego. Przemysłowa przeszłość terenu sprawiła, że na powierzchni jest on przykryty warstwą niekontrolowanych nasypów o zmiennej miąższości, od 0,5 do ponad 10 metrów. Skład nasypów jest

bardzo zróżnicowany – budują je gliny, piaski, okruchy cegieł i łupków węglowych, łupki ilaste, żwiry i kamienie. Poniżej zalegają grunty o bardzo dobrych parametrach geotechnicznych.



Rys. 1. Plan osiedla – oznaczenia budynków

Ze względu na różnorodność warstw wierzchnich (z dominacją materiałów hałdy górniczej), silne zróżnicowanie zagęszczenia nasypu oraz znacznie zmieniającą się miąższość, inwestor zdecydował o wzmocnieniu słabego podłoża gruntowego metodą konsolidacji dynamicznej. Główne kraterzy zagęszczanego obszaru zaprojektowano w siatce $4,0 \times 4,0$ m. Dodatkowo, w fazie dogęszczania (prasowania), przewidziano układ 453 kraterów w regularnej siatce $2,0 \times 2,0$ m. Do konsolidacji stosowano ubijak o wymiarach $1,2 \times 1,2 \times 1,0$ m i masie 13,5 tony, zrzucany z wysokości 10 m.

Projektant metody przewidział możliwość negatywnego wpływu zagęszczania na sąsiadujące obiekty i zalecił pomiary drgań. Na tej podstawie inwestor zlecił ekspertyzę [1], w wyniku której wpływy dynamiczne na istniejące budynki zakwalifikowano jako nieszkodliwe.

Odrębny problem stanowił wpływ wstrząsów na świeżo betonowane stropy i ściany najbliższego budynku C2, którego krawędź zlokalizowana była w odległości 35 m od najbliższego krateru. Określona metodą Zellera bezpieczna amplituda przyspieszeń dla teoretycznie ukończonego budynku (II stopień zagrożenia), przy dominującej częstotliwości drgań 10 Hz, wynosi 200 mm/s^2 , tymczasem przyspieszenia pionowe zmierzone na stropie w odległości 40 m od krateru sięgały 120 mm/s^2 , natomiast przyspieszenia poziome około 40 mm/s^2 . Jednocześnie, przy wzroście odległości punktu pomiarowego do około 60 m, przyspieszenia pionowe spadały do 40 mm/s^2 , to jest do 20% przyspieszeń bezpiecznych dla ukończonej konstrukcji. Zakładając liniową zależność pomiędzy przyspieszeniem i generowanymi w konstrukcji siłami bezwładności, autor ekspertyzy [1] zaproponował wprowadzenie koordynacji czasowej prac przy konsolidacji podłoża pod budynkiem C3 i betonowaniu w budynku C2 tak, aby odległość wykonywanych kraterów od betonowanych i dojrzewających stropów była nie mniejsza niż 50 m. Powrót do wykonywania bliżej usytuowanych kraterów dopuszczono po pięciu dniach od zakończenia betonowania, czyli po przewidywanym osiągnięciu przez beton 20% wytrzymałości projektowanej.

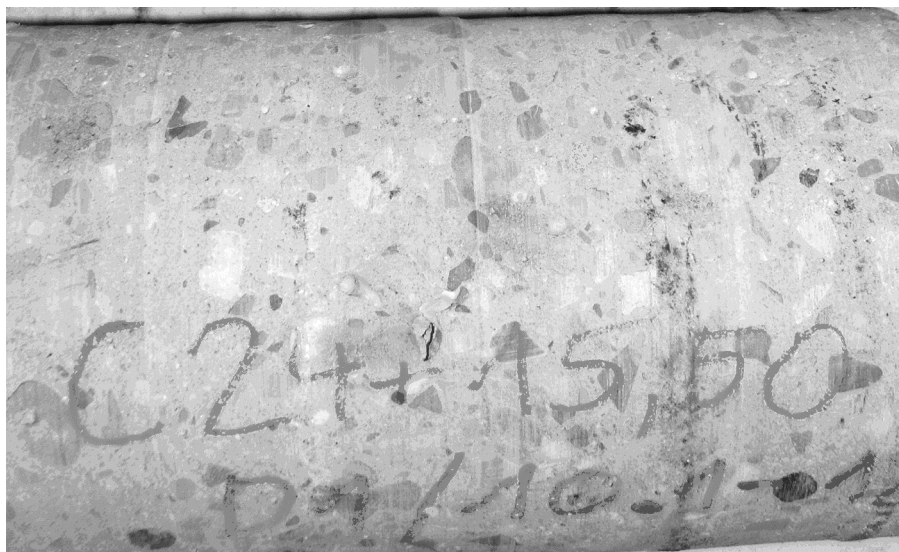
Przedstawione zalecenia zostały zakwestionowane przez wykonawcę budynku C2, w efekcie czego inwestor zlecił autorom niniejszego referatu ekspertyzę wpływu drgań na warunki dojrzewania betonu w stropach i ścianach wznoszonego budynku C2 [2].

2. Wpływ konsolidacji dynamicznej na warunki dojrzewania betonu

Wpływ obciążeń dynamicznych na młody beton można rozpatrywać w dwóch fazach:

- faza pierwsza – układanie i zagęszczanie mieszanki, aż do rozpoczęcia wiązania, kiedy należy oczekiwać korzystnego wpływu drgań, objawiającego się lepszym rozplywem mieszanki w deskowaniu i lepszym jej zagęszczeniem; jedynym negatywnym efektem może być segregacja, której objawy są podobne do skutków przewibrowania,
- faza druga – wiązanie i dojrzewanie betonu, kiedy negatywny wpływ obciążeń dynamicznych może objawiać się mikrospekaniem i zarysowaniami struktury betonu, głównie na powierzchni większych ziaren kruszywa, a w drugiej kolejności w matrycy cementowej; efektem tych wad jest obniżenie wytrzymałości betonu.

W dniu 03.01.2008 r. ze stropów i ścian budynku C2, betonowanych w okresie od 14.11.2007 do 23.11.2007, pobrano 11 próbek rdzeniowych o średnicy 140 mm. Po osuszeniu i oczyszczeniu próbki poddano szczegółowym badaniom, w celu stwierdzenia obecności ewentualnych uszkodzeń struktury betonu. Przeprowadzone oględziny pobocznic próbki wykazały jednorodny rozkład ziaren kruszywa grubego na wysokości próbek i brak nietypowo grubej warstwy zaczynu cementowego przy ich górnych powierzchniach, co jednoznacznie wyklucza możliwość wystąpienia zjawiska segregacji (rys. 2). Przeprowadzone szczegółowe oględziny mikroskopowe próbki nie wykazały mikrozarzysowań lub odspojonych od zaczynu, luźnych ziaren kruszywa.



Rys. 2. Przykładowe rozmieszczenie ziaren kruszywa grubego w próbce rdzeniowej

Kolejnym krokiem było wykonanie badań wytrzymałościowych. Po przycięciu do wysokości 140 mm próbki poddano niszczącemu badaniu wytrzymałości na ściskanie (w prasie hydraulicznej). Pomimo, że w chwili badania wiek wszystkich próbek przekroczył 28 dni, analiza wyników badań przeprowadzona zgodnie z normą PN-EN 206-1:2003 [3] pozwoliła zakwalifikować beton zaledwie do klasy C20/25, tymczasem projekt zakładał klasę C30/37.

Należy podkreślić, że dojrzewanie betonu odbywało się w warunkach temperaturowych oscylujących wokół 0°C. W produkcji mieszanki betonowej zastosowano cement CEM II/B-S 32,5 wraz z 20% dodatkiem popiołów lotnych. Obydwa te czynniki, bez wątpienia, ograniczyły tempo przyrostu wytrzymałości betonu. Tezę tą potwierdzały także wykonane wcześniej badania próbek kostkowych wykonanych w trakcie betonowania, które po 3 dniach osiągnęły zaledwie około 10% wytrzymałości charakterystycznej, a po 6 dniach niecałe 14%. Próbki te dojrzewały w warunkach budowy, w okresie w którym wstrzymano już konsolidację dyna-

miczną. W celu określenia wpływu warunków dojrzewania dokonano zatem teoretycznej analizy prędkości przyrostu wytrzymałości zastosowanego betonu.

3. Analiza możliwego rozwoju wytrzymałości betonu

Betonowanie badanych elementów prowadzono w okresie późnojesiennym, przy średniej dobowej temperaturze w granicach $-4^{\circ}\text{C}\div+2^{\circ}\text{C}$. Pomimo niekorzystnych warunków, wykonawca nie stosował żadnych metod podgrzewania lub ocieplania dojrzewającej konstrukcji.

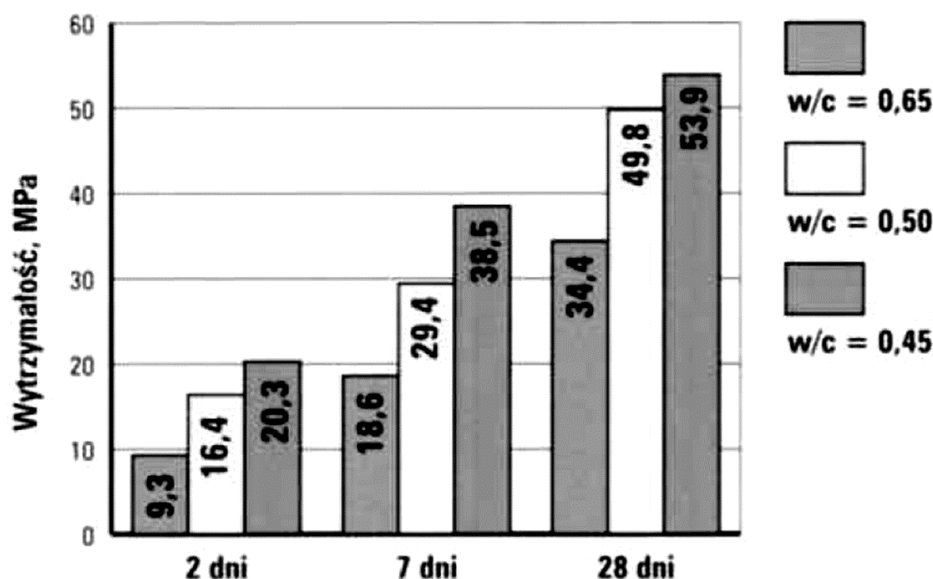
Prędkość przyrostu wytrzymałości zależy głównie od rodzaju zastosowanego cementu, stosunku wodno-cementowego oraz, szczególnie w początkowej fazie, od zastosowanych domieszek. W tabelicy 1 przedstawiono recepturę zastosowanej mieszanki betonowej. Stosunek wodno-cementowy, uwzględniając zawartość popiołów lotnych, wynosi 0,43.

Tablica. 1. Receptura stosowanej mieszanki betonowej

Kruszywo (frakcje)	0÷2 mm	710 kg
	2÷8 mm	410 kg
	8÷16 mm	440 kg
	16÷32 mm	200 kg
Cement	CEM II/B-S 32,5	320 kg
Dodatek	popiół lotny	80 kg
Superplastyfikator	FM 2001	3,0 kg
Woda		170 litrów

Na podstawie karty katalogowej cementu CEM II/B-S 32,5R, produkowanego przez Górażdże Cement [4], przyjęto, że dla betonu wykonanego z tego cementu, przy stosunku W/C równym 0,45, po zastosowaniu 350 kg cementu na 1 m^3 betonu, przyrost wytrzymałości betonu wynosi (rys.3):

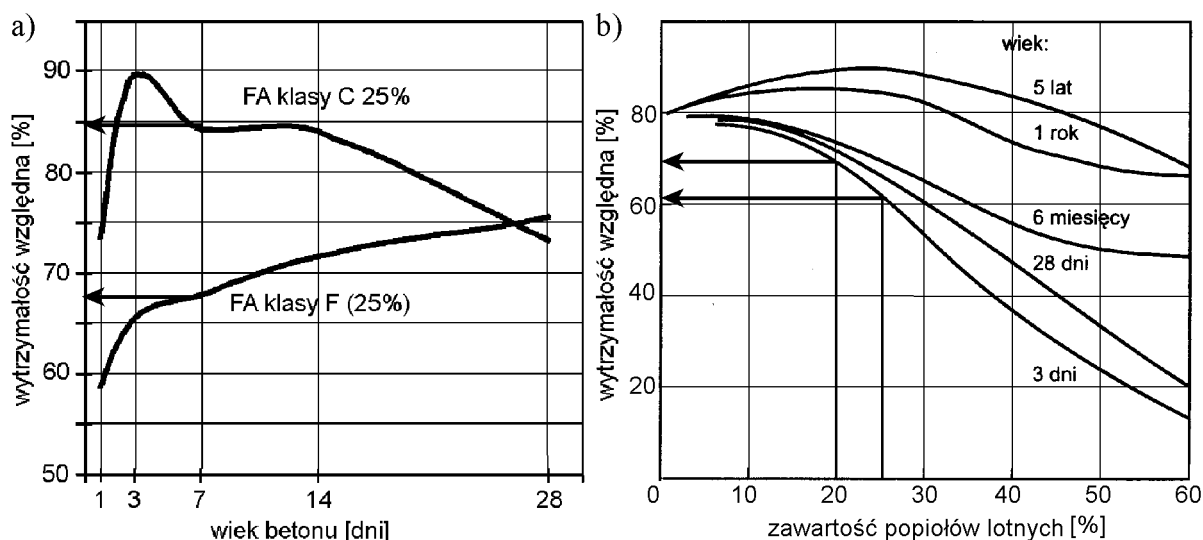
- 37% po dwóch dniach,
- 71% po siedmiu dniach.



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie betonu wykonanego z cementu CEM II/B-S 32,5R [4]

Reakcje chemiczne popiołu lotnego zależą od właściwości cementu portlandzkiego, który został zastosowany, a podstawowe oddziaływanie fizyczne polega na zagęszczaniu cząstek popiołów lotnych na powierzchni rozdziału ziaren kruszywa grubego. Zakres zagęszczania zależy zarówno od popiołu lotnego jak i stosowanego cementu (lepsze zagęszczenie uzyskuje się przy mieszaniu bardziej grubego cementu portlandzkiego z drobniejszym popiołem). Na reaktywność popiołów znacznie wpływa zawartość szkliva. Popioły klasy C (z większą zawartością tlenku wapnia), w odróżnieniu od popiołów klasy F (krzemionkowych), posiadają pierwotnie niewielkie właściwości wiążące, stąd zawartość wapna ma również wpływ na początkową reaktywność. Z przedstawionych przyczyn ilościowe przewidywanie wpływu popiołu lotnego na wytrzymałość betonu nie jest możliwe bez wnikliwych badań fizycznych i chemicznych, także w aspekcie cementu stosowanego wraz z popiołem. Rygory czasowe ekspertyzy uniemożliwiały wykonanie takich badań, dlatego dalszą analizę prowadzono przyjmując możliwie niekorzystne założenia.

Na rysunku 4a pokazano porównanie przyrostu wytrzymałości betonu w walcowych próbkach w pierwszych 28 dniach dojrzewania na podstawie przykładowych badań [5]. Zawartość materiału cementowego w mieszankach wynosiła 307 kg/m^3 , a zawartość popiołów lotnych 25% masy całego spoiwa. Badania przeprowadzono dla dość niekorzystnego, ze względu na wpływ popiołu, uziarnienia kruszywa ($\max d_g = 9,5 \text{ mm}$). Wyniki dla popiołów klasy C i F odniesiono do rezultatów otrzymanych dla cementu portlandzkiego bez domieszek. Można przyjąć, że średni przyrost wytrzymałości betonu z popiołami klasy F, w pierwszym tygodniu wynosi około 67% przyrostu betonu bez popiołów.



Rys. 4. Wpływ popiołów lotnych na przyrost wytrzymałości betonu, a) wg [5], b) wg [6]

Przedstawione analizy dotyczą 25% zawartości popiołów w masie spoiwa. W betonie zastosowanym w przedmiotowym budynku zawartość ta wynosiła 20%. Należy zatem spodziewać się nieco mniejszej redukcji przyrostu wytrzymałości niż w cytowanych badaniach [5]. W celu określenia wpływu zawartości popiołów posłużono się badaniami Odlera [6], których wyniki pokazano na rysunku 4b. Otrzymany w tym przypadku przyrost wytrzymałości, odniesiony do betonu bez domieszki popiołu, w pierwszym tygodniu wynosi:

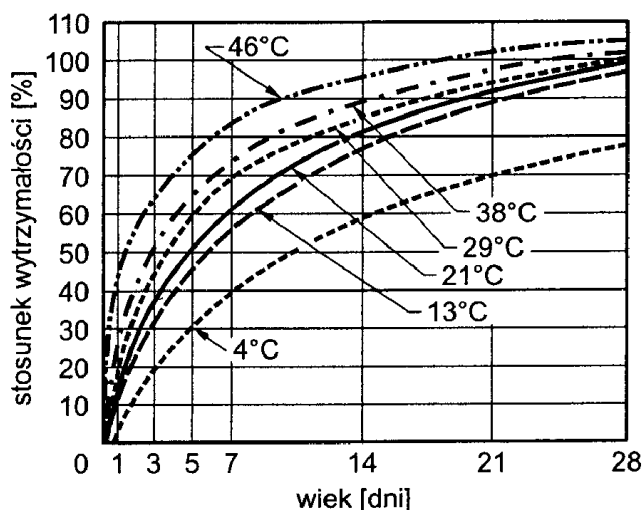
- 81% przy zawartości popiołów lotnych 25%,
- 90% przy zawartości popiołów lotnych 20%.

Przyjmując możliwie niekorzystną sytuację – zastosowanie tylko popiołów klasy F, przy jednocześnie niekorzystnym uziarnieniu kruszywa (w stosowanej mieszance występują także

frakcje większe niż 9,5mm), można uznać, że występujący spadek przyrostu wytrzymałości w pierwszym tygodniu dojrzewania nie będzie większy niż 25%.

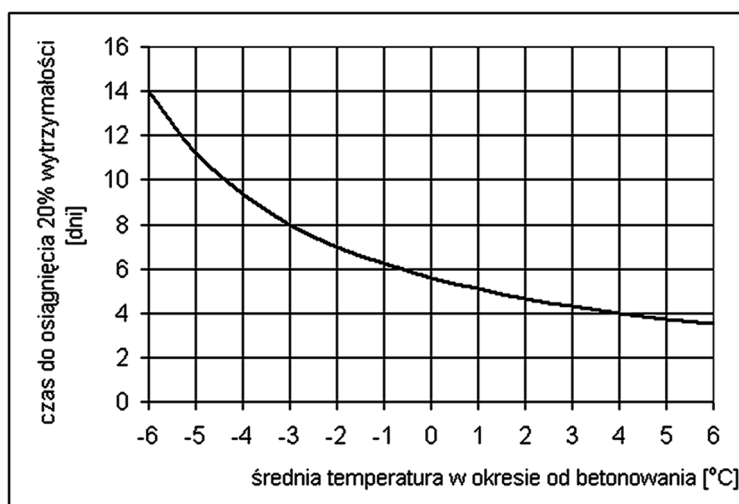
$$100\% - 67\% \cdot \frac{90\%}{81\%} \approx 25\% \quad (1)$$

Ponieważ przyrost wytrzymałości zależy jednocześnie od wieku i temperatury, często opisuje się go funkcją zwaną dojrzałością, wyrażoną iloczynem czasu i temperatury [7]. Za wartość bazową, od której naliczana jest temperatura, zazwyczaj przyjmuje się -10°C (poniżej tej temperatury przyrost wytrzymałości betonu w czasie jest bardzo niewielki).



Rys. 5. Stosunek wytrzymałości betonu pielęgnowanego w różnych temperaturach [8]

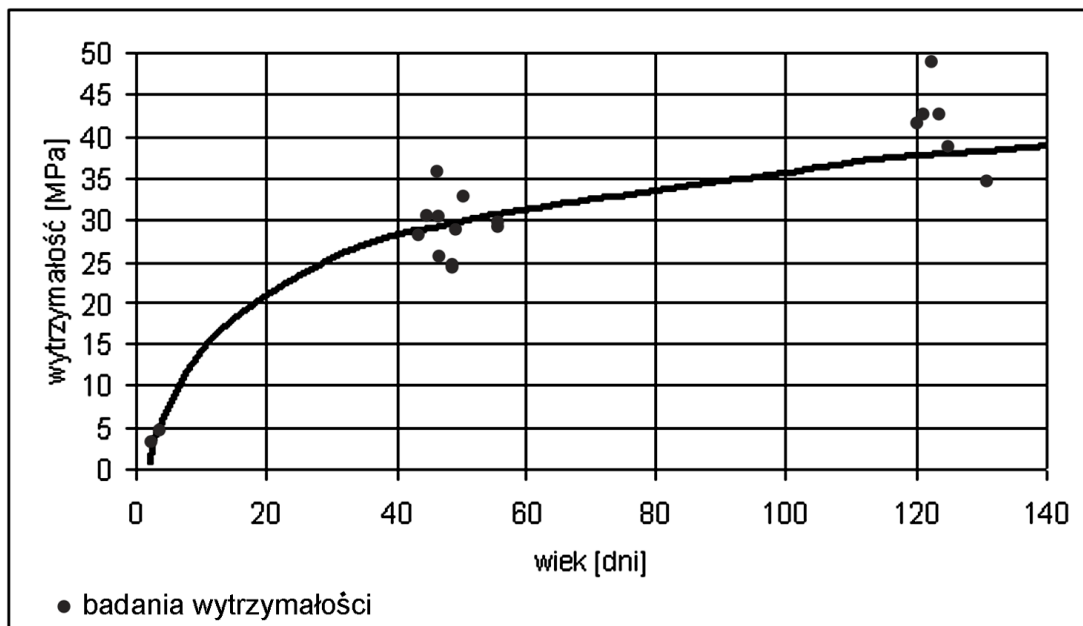
Poszukując czasu potrzebnego do osiągnięcia 20% wytrzymałości charakterystycznej przeprowadzono analizę możliwych przyrostów wytrzymałości stosowanego betonu, uwzględniając funkcję dojrzałości [7]. Wpływ temperatury na narastanie wytrzymałości określono na podstawie krzywych przedstawionych przez Price'a [8] (rys. 5). Zgodnie z wcześniej przedstawionymi rozważaniami uwzględniono także 25% redukcję ze względu na zastosowanie popiołów lotnych. Wyniki, w formie zależności pomiędzy temperaturą dojrzewania, a czasem potrzebnym do osiągnięcia wymaganej wytrzymałości, pokazano na wykresie (rys.6).



Rys. 6. Wiek betonu wymagany do osiągnięcia 20% wytrzymałości charakterystycznej

Na podstawie przedstawionej zależności dopuszczono powrót do zagęszczania po 5 dniach (wymóg opinii [1]) pod warunkiem, że średnia temperatura w tym okresie przekracza $+1^{\circ}\text{C}$. W przypadku niższych temperatur zalecono stosowanie się do krzywej z rysunku 6, ewentualnie dopuszczono skrócenie niezbędnego czasu, pod warunkiem stosowania dodatkowych zabiegów pielęgnacyjnych, polegających na ogrzewaniu dojrzewającego betonu. Przy temperaturach poniżej -5°C wykluczono prowadzenie betonowania bez stosownej pielęgnacji.

Na podstawie przedstawionych wcześniej zależności określono także teoretyczny przyrost wytrzymałości betonu w warunkach zimowych. Jak pokazano na rysunku 7, w warunkach utrzymywania się średniej temperatury w okolicy -2°C , przyrost wytrzymałości betonu może zostać spowolniony prawie pięciokrotnie.



Rys. 7. Prognozowany przyrost wytrzymałości betonu w średniej temperaturze -2°C

Ze względu na szereg poczynionych uproszczeń, a w szczególności na wspomniany wcześniej brak możliwości jednoznacznego określenia wpływu popiołów lotnych na przyrost wytrzymałości, wyniki przedstawionej analizy zdecydowano się potwierdzić ponownym badaniem wytrzymałości próbek. pobranych z konstrukcji po czterech miesiącach od zabetonowania. W tym celu, w dniu 26.03.2008 roku, ze stropów budynku C2 pobrano 6 próbek rdzeniowych o średnicy 99 mm [9]. Po osuszeniu i oczyszczeniu próbki poddano szczegółowym oględzinom, w celu stwierdzenia obecności ewentualnych uszkodzeń struktury betonu, a następnie, po przycięciu do wysokości około 100 mm, poddano niszcącemu badaniu wytrzymałości na ściskanie.

Oględziny próbek rdzeniowych nie wykazały uszkodzeń w postaci mikrozarysowań w macrycy cementowej i na powierzchni ziaren kruszywa, które mogłyby powstać w okresie dojrzewania betonu w warunkach wpływów dynamicznych. Wytrzymałość betonu w konstrukcji osiągnęła wartości właściwe dla zastosowanej klasy C30/37. Potwierdziło to wstępnie założoną tezę, że opóźnienie wiązania betonu spowodowane było znaczną zawartością popiołów lotnych w mieszance oraz dojrzewaniem w obniżonej temperaturze, zaś wpływy dynamiczne nie obniżyły docelowej wytrzymałości betonu.

Wyniki przeprowadzonych badań wytrzymałości, naniesione na wykres prognozowanego przyrostu wytrzymałości (rys. 7), potwierdziły poprawność sporządzonych nomogramów do określania przyrostu wytrzymałości zastosowanego w konstrukcji betonu.

4. Podsumowanie

Przedstawiony w referacie przypadek nasuwał podejrzenia negatywnego wpływu dynamicznej konsolidacji podłoża na proces wiązania świeżego betonu w sąsiadującym obiekcie. Założenie to zdawały się potwierdzać niskie wyniki wytrzymałości betonu w pobranych próbkach.

Jednocześnie jednak, mikroskopowe oględziny próbek rdzeniowych nie wykazały uszkodzeń w postaci segregacji kruszywa lub mikrozarysowań w matrycy cementowej i na powierzchni ziaren kruszywa, które mogłyby powstać w okresie dojrzewania betonu w warunkach zbyt silnych wpływów dynamicznych. Przyczyną zbyt niskiej wytrzymałości betonu nie były zatem uszkodzenia jego struktury spowodowane wpływami dynamicznymi, lecz znaczne spowolnienie wiązania, wywołane zastosowanym cementem, znaczną zawartością popiołów lotnych w mieszance oraz, co najważniejsze, dojrzewaniem w obniżonej temperaturze. Wytrzymałość betonu w konstrukcji osiągnęła wartości właściwe dla zastosowanej klasy dopiero po ponad czterech miesiącach od betonowania, zgodnie z teoretycznymi przewidywaniami autorów.

Należy podkreślić, że w opisywanym przypadku deskowanie ścian i stropów prawidłowo spełniło swą rolę, przenosząc obciążenia zewnętrzne i nie dopuszczając do powstania nadmiernych pierwotnych deformacji i zarysowań konstrukcji.

Literatura

1. Właszczuk M.: „Badania wpływu drgań wywołanych konsolidacją dynamiczną podłoża na obiekty sąsiadujące z budową osiedla w Katowicach (III etap – budynek C3)”, listopad 2007.
2. Ajdukiewicz A., Hulimka J., Krzywoń R. Ekspertyza techniczna w sprawie wpływu dynamicznej konsolidacji podłoża budynku C3 na konstrukcję żelbetową stropów i ścian budynku C2, wznoszonego na terenie zespołu mieszkalnego w Katowicach. NB-277/RB-6/2007, Etap 1 (grudzień 2007) i Etap 2 (styczeń 2008). Politechnika Śląska, Katedra Inżynierii Budowlanej.
3. PN-EN 206-1:2003 „Beton. Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja, zgodność”.
4. Karta katalogowa Górażdże Cement “Cement portlandzki żuźlowy PN-EN 197-1 CEMII/B-S 32,5R”.
5. Gebler S.H., Klieger P.: Effect of fly ash on physical properties of concrete, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, vol. 1, ACI SP-91, Detroit, Michigan, 1986.
6. Odler I.: Final report of Task Group 1, 68MMH Technical Committee on Strength of Cement, Materials and Structures nr 140 (1991), s. 143–157.
7. Neville A.M. „Właściwości betonu”, wyd. Polski Cement, Kraków 2000 r.
8. Price W.H.: Factors influencing concrete strength, J. Amer. Contr. Inst., 02.1951, s. 417–432.
9. Ajdukiewicz A., Hulimka J.: Wyniki kontrolnych badań betonu w stropach budynku C2 wznoszonego na terenie zespołu mieszkaniowego w Katowicach. NB-61/RB-6/2008. Politechnika Śląska, Katedra Inżynierii Budowlanej, marzec 2008.