

O problemach realizacyjnych fundamentu pod turbozespół



prof. dr hab. inż.
TADEUSZ URBAN
Politechnika Łódzka
Katedra Budownictwa Betonowego
ORCID: 0000-0001-7494-3747



mgr inż.
RADOŚLAW WALENDZIAK
Politechnika Łódzka
Katedra Budownictwa Betonowego
ORCID: 0000-0001-8333-2366



dr inż.
MICHAŁ GOŁDYN
Politechnika Łódzka
Katedra Budownictwa Betonowego
ORCID: 0000-0002-7791-1940

W artykule przedstawiono problemy realizacyjne związane z budową żelbetowej konstrukcji fundamentu pod turbozespół w budynku maszynowni nowo budowanej elektrowni.

Wprowadzenie

Ze względu na duże wymiary poszczególnych elementów wspomnianej konstrukcji można je zaliczyć do obiektów masywnych (rys. 1). Opisujący problem dotyczył żelbetowych słupów (filarów) pomiędzy dolną i górną płytą fundamentową, których wysokość wynosiła ponad 12 m. Wymiary przekrojów poprzecznych tych filarów to 2,50 x 1,60 m i 5,10 x 1,50 m pod częścią turbinową oraz 2,60 x 1,50 m i 2,20 x 1,50 m pod częścią generatora (rys. 2).



Rys. 1. Widok ogólny fundamentu turbozespołu

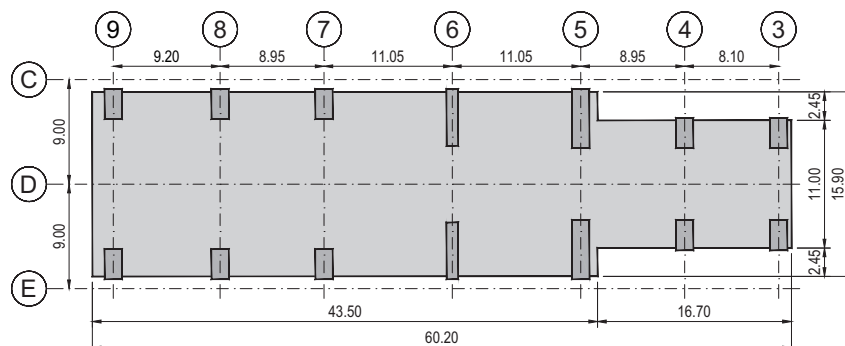
Po demontażu deskowania słupów okazało się, że na ich powierzchniach występują liczne ubytki – „raki”, których przykładowy obraz po rozkuciu i usunięciu luźnych fragmentów pokazano na rys. 3.

Opis zbrojenia słupów

Zbrojenie główne słupów stanowiły pręty $\varnothing 32$, rozmieszczone równomiernie na obwodzie. Były one utrzymywane przez strzemiona i „szpilki”, wykonane z prętów $\varnothing 12$, rozmieszczone w rozstawie co 100 mm (w obszarach zakładów zbrojenia głównego i w sąsiedztwie krótkich wsporników) oraz 200 mm (w pozostałej części słupa) – patrz rys. 4. Projektowana otulina prętów słupów wynosiła 35 mm. Zbrojenie wykonano ze stali klasy A-IIIIN (B500SP).

Opis działań eksperckich

Z uwagi na sugestie niektórych uczestników procesu inwestycyjnego, wskazujących na konieczność wyburzenia i ponownego wzniesienia wykonanej w 80% konstrukcji, Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej zlecono przygotowanie niezależnej ekspertyzy. Jej celem miała być ocena wpływu stwierdzonych uszkodzeń na trwałość konstrukcji i możliwości naprawy defektów. Podstawowe pytanie, na które należało odpowiedzieć, dotyczyło również jednorodności struktury betonu – a zatem oceny możliwości występowania wewnętrznych „raków”, kawern, rozfrakcjonowanego betonu – defektów niewidocznych na powierzchniach zewnętrznych elementów. Ekspertyza obejmowała:



Rys. 2. Rzut konstrukcji wsporczej fundamentu turbozespołu – układ słupów

- ocenę technologii betonowania słupów od poziomu 0,00 do +9,00 m z uwagi na sugerowaną możliwość powstania tzw. zimnych styków (*cold joints*),
- badanie wytrzymałości betonu na ściskanie na próbkach z pobranych odwiertów,
- ocenę jednorodności struktury betonu za pomocą badań nieniszczących,
- ocenę planu napraw opracowanego przez wykonawcę konstrukcji.

Ocena technologii betonowania słupów i receptury mieszanki betonowej

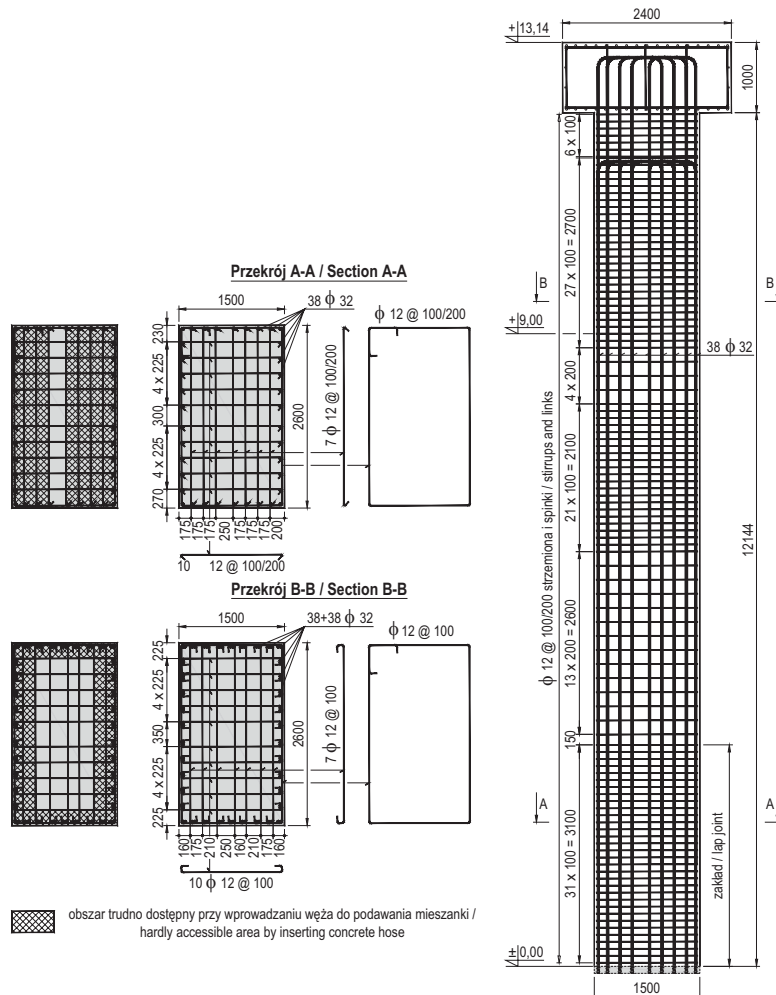
Wykonawca robót żelbetowych przygotował Projekt Organizacji i Technologii Betonowania (POITB) zawierający szczegółowy plan postępowania podczas betonowania słupów od poziomu +0,00 m do poziomu +9,00 m. Z uwagi na dużą wysokość betonowanych słupów (9 m) w POITB zwrócono szczególną uwagę na tempo betonowania. Aby ograniczyć ryzyko przemieszczenia lub rozszczelnienia szalunków podczas betonowania, parcie świeżej mieszanki betonowej nie mogło przekroczyć wartości dopuszczalnych, określonych przez dostawcę systemu deskowania. Przyjęto betonowanie każdego słupa etapami, poprzez wypełnianie deskowania betonem na wysokość około 1 m. Po ułożeniu warstwy betonu o tej wysokości końcówkę pompy przenoszono do sąsiedniego słupa i proces powtarzano. Po zabetonowaniu w ten sposób pary słupów operację powtarzano dla kolejnych 2 elementów, po czym ponownie wracano do pierwszego. Mieszankę układano warstwami 0,30 ÷ 0,40 m i zagęszczano minimum 4 pograżanymi wibratorami buławowymi opuszczanymi z poziomu +9,00 m.

Przyjęty sposób betonowania determinował recepturę mieszanki, której zagęszczenie powinno być możliwe w dłuższym okresie. Miało to zapobiec powstawaniu tzw. zimnych styków (*cold joints*) – miejsc, w których wskutek przedwczesnego związania betonu nie zapewniono by połączenia kolejnych jego warstw. Technologia betonowania nie przewidywała przerw w betonowaniu słupów. Z założenia każdy słup betonowano w sposób ciągły, mając na uwadze odstęp czasowy pomiędzy następującymi po sobie etapami betonowania i konieczność połączenia kolejnej układanej warstwy z wcześniej wbudowaną.

Skład mieszanki betonowej zaprojektowano tak, aby spełnić wymagania projektowe (klasa wytrzymałości, ekspozycji itp.) i technologiczne (wynikające ze sposobu układania betonu warstwami). Opóźnienie procesów wiązania cementu uzyskano poprzez zastosowanie domieszki chemicznej BASF Pozzolith 433R686 w ilości 0,2% masy cementu. Podczas prób w wytwórni stwierdzono, że dodatek domieszki opóźniającej wiązanie wydłuża czas urabialności do około 7 godzin,



Rys. 3. Przykłady uszkodzeń słupów fundamentu turbozespołu



Rys. 4. Przykład zbrojenia jednego ze słupów w osiach C/9

Tablica 1. Zestawienie wyników badań gęstości i wytrzymałości betonu pobranego z konstrukcji

Słup	Gęstość betonu z odwiertów	Oznaczenie próbki	Gęstość betonu z próbek	Wytrzymałość na ściskanie $f_{(i),is}$	Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{m(n),is}$	Średnia gęstość betonu
	[kg/m ³]		[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[kg/m ³]
4/E	2426	4/E 1	2434	75,5	69,4	2420
		4/E 3	2391	72,7		
5/C	2470 ¹	5/C 1	2470	68,8		
		5/C 3	2360	71,2		
7/E	24961	7/E 1	25412	60,9		
		7/E 3	2445	67,0		

¹ Odwierty zawierały pręty zbrojenia
² Próbką zawierała pręt zbrojenia

przy założeniu że temperatura zewnętrzna nie przekracza znacząco 20°C.

Betonowanie słupów odbywało się 17/18 i 26/27 czerwca 2014 r. Z danych pogodowych wynikało, że temperatura w tych dniach nie przekroczyła 22°C, zatem nie miała wpływu na zmianę czasu urabialności mieszanki. Na podstawie dokumentów dostaw betonu (kart WZ wystawionych przez wytwórnię betonu) stwierdzono, że czas transportu od momentu załadowania betonowozu w wytwórni do rozpoczęcia rozładowania na placu budowy nie przekraczał 25 minut. Z analizy wszystkich dowodów dostaw mieszanki z dni betonowania słupów wynika, że czas pomiędzy załadunkiem i całkowitym rozładunkiem na placu budowy w większości przypadków trwał średnio około 60 minut i nigdy nie przekroczył 150 minut. Uwzględniając sposób betonowania słupów, a także ich wymiary (2,6 x 1,5 m), zabetonowanie 4 słupów do wysokości 1 m wymagało podania około 16 m³ mieszanki (2 betonowozy). Słupy betonowano z użyciem dwóch pomp, zatem przerwa pomiędzy ułożeniem kolejnych warstw betonu w danym słupie nie mogła przekroczyć 2,5 godziny. Mieszanka w tym okresie powinna

mieć właściwości świeżego betonu i prawidłowe zagęszczanie mieszanki (poprzez zanurzanie buławy tak, aby obszary vibracji były nieprzerwane) powinno zapewnić właściwe połączenie kolejnych warstw betonu.

Słupy zostały zaprojektowane z betonu klasy C30/37. Kruszywo drobne stanowił piasek, natomiast grube, frakcji 2/8, 8/16 i 16/22 – dolomit. Zastosowano cement hutniczy o niskim cieple hydratacji, podwyższonej odporności na siarczany i obniżonej zawartości alkaliów CEM III 42,5N LH/HSR/NA, popiół lotny w ilości odpowiednio 260 kg/m³ i 90 kg/m³. Wodę dozowano w ilości 155 dm³/m³, natomiast w celu zwiększenia urabialności mieszanki betonowej zastosowano domieszki BASF BV18 (0,6% m.c.) i BASF Glenium SKY 686 (0,9% m.c.). Tak zaprojektowany skład mieszanki powinien gwarantować konsystencję odpowiadającą klasie S4 według PN-EN 12350-2 [1] i uzyskanie parametrów betonu spełniającego wymagania klasy ekspozycji XC1 według [2].

Z informacji uzyskanych od wykonawcy prac wynikało, że dostarczana mieszanka nie budziła zastrzeżeń i została w całości wbudowana. Betonowanie prowadzono w sposób

ciągly od poziomu ±0,00 m do poziomu +9,00 m, wykonując równocześnie belki znajdujące się na poziomie +8,00 m. Prowadzone równocześnie przez niezależne laboratorium badania konsystencji mieszanki betonowej metodą opadu stożka wykazały, iż początkowo wynosił on 130 do 160 mm (5 kolejnych betonowozów ~ 45 m³), co odpowiada klasie konsystencji S3 według [1]. Następne pomiary wykazywały już większy opad rzędu 190 ÷ 210 mm (klasa S4).

Badanie wytrzymałości betonu

Kontrolę wytrzymałości na ściskanie betonu wbudowanego w słupy przeprowadzono na podstawie wyników badań niszczących próbek przygotowanych z pobranych z odwiertów. Do oceny wybrano 3 słupy w osiach 4/E, 5/C i 7/E, w których stwierdzono wizualnie powierzchniowe uszkodzenia. W przypadku słupów w osiach 4/E i 5/C odwierty pobrano z obszarów skutego betonu, dla słupa 5/C z miejsca nieuszkodzonego powierzchniowo (rys. 5.). Rdzenie betonowe zostały pobrane przez firmę wynajętą przez zleceniodawcę, ekspertyzy w obecności przedstawicieli zleceniodawcy, nadzoru, inwestora, głównego wykonawcy, projektanta obiektu oraz przedstawiciela Politechniki Łódzkiej. Wykonano łącznie 3 odwierty na wysokości około 1 m od poziomu ±0,00 m do głębokości około 30 cm, zachowując kierunek prostopadły do kierunku betonowania (rys. 6.).

Podczas oceny wizualnej powierzchni pobranych odwiertów, a także po ich przecięciu na próbki, nie stwierdzono pustek powietrznych lub nieciągłości struktury betonu. Kruszywo o średnicy do 22 mm było równomiernie rozłożone na długości odwiertu. Na powierzchni pobocznych odwiertów zaobserwowano typowe pojedyncze pęcherze powietrza o wielkości do 5 mm, niepowodujące jednak obniżenia jakości i trwałości betonu.

Próbki do badań przygotowano zgodnie z [3] i poddano próbie ściskania według [4] w obecności przedstawicieli zleceniodawcy i inwestora. Uzyskane wyniki badań zestawiono w tablicy 1.

Podczas betonowania słupów pobierano próbki sześcienne do badań wytrzymałości na ściskanie. Średnia wytrzymałość f_{cm}^{cube}



Rys. 5. Lokalizacja pobranych rdzeni betonowych



Rys. 6. Rdzenie betonowe pobrane do badań

betonu pobranego w dniach 17 i 18 czerwca wynosiła 55,6 MPa. Na podstawie wyników badań *in situ* beton w konstrukcji po około 75 dniach dojrzewania można było zakwalifikować do klasy C55/67 zgodnie z [5]. Tym samym beton spełniał wymagania dotyczące projektowanej wytrzymałości na ściskanie. Zauważalny przyrost wytrzymałości na ściskanie względem badania po 28 dniach jest procesem naturalnym, wynikającym z rodzaju zastosowanego cementu hutniczego.

Ocena jednorodności betonu za pomocą badań nieniszczących

Ocena wizualna słupów ograniczała się jedynie do widocznych powierzchni, dlatego też w celu identyfikacji uszkodzeń wewnętrznych rozszerzono ją o badania nieniszczące, z użyciem sprzętu wykorzystującego zjawisko rozchodzenia się fali akustycznej w betonie. Wykonano je we wszystkich 14 słupach od poziomu $\pm 0,00$ do $+9,00$ m, stanowiących podpory górnej płyty fundamentu turbozespołu. Badanie ultradźwiękowe betonu przeprowadzono zgodnie z normą [6]. Do określenia prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych zastosowano betonoskop Controls 58-E0048, stosując technikę pomiaru bezpośredniego, z głowicami umieszczonymi na przeciwległych powierzchniach elementu. Taki sposób pomiaru jest obciążony najmniejszym błędem (i zalecany w [7]), gdyż energia zarejestrowanych fal akustycznych jest największa.

Rozstaw punktów pomiarowych ustalono na 50 cm w poziomie i 100 cm w pionie – rys. 7. Liczba przygotowanych punktów pomiarowych zależała od wymiarów słupów i wynosiła, w zależności od słupa, od 38 do 40. W przypadku stwierdzenia anomalii liczbę punktów pomiarowych na danym obszarze zwiększano. Długość drogi przebiegu fali w każdym przypadku była taka sama i odpowiadała szerokości słupa, tj. 150 cm lub 100 cm. Wyniki pomiarów zestawiono w tablicy 2.

W każdym z badanych słupów uzyskano zbliżone wartości czasów przebiegu fali ultradźwiękowej. Średnia wartość czasu przebiegu dla wszystkich 14 słupów wynosiła 4,83 km/s.

Tablica 2. Zestawienie wyników badań ultradźwiękowych

Słup	Wymiary przekroju słupa	Liczba miejsc pomiarowych	Średni czas przebiegu fali T	Średnia prędkość przebiegu fali V	Współczynnik zmienności prędkości v
	[cm] × [cm]	[szt.]	[μ s]	[km/s]	[%]
3/C	220 × 150	30	308,3	4,87	0,63
3/E	220 × 150	36	309,5	4,85	0,67
4/C	260 × 150	38	309,6	4,85	0,73
4/E	260 × 150	30	309,3	4,85	0,80
5/C	510 × 150	66	312,2	4,80	1,07
5/E	510 × 150	48	311,3	4,82	0,93
6/E	ściana × 100	35	208,2	4,80	1,53
6/C	ściana × 100	35	207,6	4,82	0,91
7/E	260 × 150	42	310,6	4,83	0,97
7/C	260 × 150	36	310,2	4,84	0,87
8/E	260 × 150	36	312,5	4,80	0,74
8/C	260 × 150	38	311,1	4,82	0,87
9/E	260 × 150	38	309,9	4,84	0,96
9/C	260 × 150	38	311,7	4,81	0,92

Współczynnik zmienności prędkości fali był w większości przypadków poniżej 1,0%, co świadczy o bardzo dobrej jednorodności betonu. Na podstawie średniej prędkości fali ultradźwiękowej $V = 4,83$ km/s $> 4,5$ km/s jakoś betonu można było określić jako bardzo dobrą, zgodnie ze wskazaniami zawartymi w pracy [7] (w ślad za [8]).

Ocena planu napraw opracowanego przez wykonawcę konstrukcji

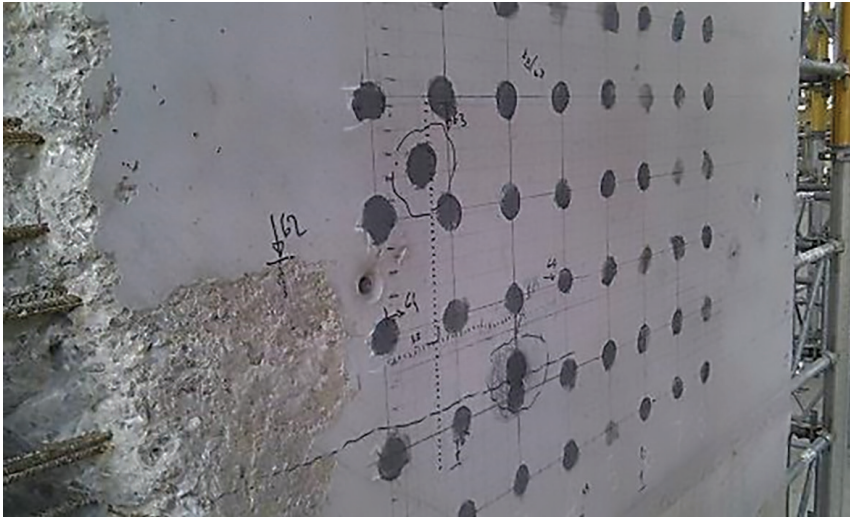
Wykonawca przedstawił plan naprawy uszkodzeń powstałych na powierzchniach słupów. W opracowaniu tym opisano technologię i określono materiały. Naprawa miała na celu przywrócenie zakładanego kształtu słupów oraz integralności i trwałości konstrukcji. Po przeprowadzonej dokładnej inwentaryzacji słupów, a wcześniej prac polegających na skuciu luźnych warstw betonu, dokonano podziału ubytków na dwie kategorie: powierzchniowe (równe otulinie strzemion do około 5 cm) i głębokie, różnicując technologię naprawy. Do naprawy powierzchniowej zastosowano zaprawę systemu naprawczego Weber Deitermann, której celem było przede wszystkim przywrócenie zakładanej geometrii ele-

mentu, odtworzenie otuliny betonowej i zabezpieczenie zbrojenia przed korozją w trakcie użytkowania konstrukcji. Do wypełnienia głębokich ubytków zaproponowano materiał firmy Pagel w postaci płynnej mieszanki typu SCC (ang. *Self Compacting Concrete* – beton samozagęszczalny), zapewniający kompatybilność cech (wytrzymałość na ściskanie, skurcz, odkształcalność termiczna, moduł sprężystości) z materiałem naprawianym.

Wnioski

Przyczyną wystąpienia uszkodzeń na powierzchniach żelbetonowych słupów fundamentu turbozespołu był brak możliwości prawidłowego podawania mieszanki betonowej do dolnych części deskowań słupów spowodowany następującymi czynnikami:

- dużym zagęszczeniem poprzecznych prętów zbrojeniowych – miejscami „oczko” siatki zbrojeniowej miało wymiar mniejszy niż 150 mm, a konieczność wprowadzenia ściągów szalunków w praktyce ograniczyła jego rozmiar do 100 x 100 mm;
- zagęszczenie zbrojenia uniemożliwiało zastosowanie klamry spinającej dwa węże do podawania betonu, której średnica w najszerszym miejscu wynosiła 240 mm



Rys. 7. Widok powierzchni filara po zakończeniu badań metodą ultradźwiękową

(pojedynczy segment węża miał długość 6 m);

- w sytuacji przymusowej zdecydowano się na podawanie mieszanki betonowej ze zbyt dużej wysokości, co sprzyjało rozfrakcjonowaniu jej składników i powstaniu widocznych „raków” w dolnych partiach słupów.

Przeprowadzone badania ultradźwiękowe słupów nie wykazały jednak wewnętrznych defektów w postaci „raków”. Po ocenie uzyskanych wyników badań betonu – nieniszczących i niszczących – podjęto decyzję o naprawie konstrukcji. Zaproponowana technologia naprawy oraz dobór materiałów naprawczych zostały pozytywnie zaopiniowane przez autorów ekspertyzy.

Literatura:

- [1] PN-EN 12350-2:2011 Badanie mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [2] PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [3] PN-EN 12390-1: 2001 Badania betonu. Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badania i form.
- [4] PN-EN 12390-3: 2001 Badania betonu. Część 3: Badanie wytrzymałości na ściskanie.
- [5] PN-EN 13791:2008 Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych.
- [6] PN-EN 12504-4: 2005 Badania betonu. Część 4: Oznaczenie prędkości fali ultradźwiękowej.
- [7] Drobiec L., Jasiński R., Piekarczyk A. Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych, tom 1, Warszawa 2013.
- [8] Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Training Course Series No. 17, International Atomic Energy Agency Vienna, 2002.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.8786

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Urban Tadeusz, Walendziak Radosław, Goldyn Michał, 2020, O problemach realizacyjnych fundamentu pod turbosespół, „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.8786

Streszczenie: W artykule omówiono problemy związane z realizacją żelbetowej konstrukcji wsporczej fundamentu turbosespołu nowo budowanej elektrowni. Analizowana konstrukcja stanowiła układ 14 słupów połączonych w górnej części belkami. Po zakończeniu be-

tonowania żelbetowych, masywnych słupów (filarów) i usunięciu deskowania stwierdzono występowanie licznych uszkodzeń o charakterze powierzchniowym i wgłębnym. Ze względu na wątpliwości dotyczące trwałości Katedrze Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej zlecono przygotowanie ekspertyzy na temat przyczyn powstałych uszkodzeń. Obejmowała ona ocenę jednorodności struktury betonu, technologii betonowania słupów, a także planu napraw opracowanego przez wykonawcę konstrukcji. Stwierdzono, że prawdopodobną przyczyną wystąpienia uszkodzeń na powierzchniach słupów był brak możliwości prawidłowego podawania mieszanki betonowej do dolnych części deskowania słupów. Ograniczenie dostępu spowodowane było dużym zagęszczeniem prętów zbrojenia poprzecznego, a co za tym idzie – koniecznością podawania mieszanki betonowej ze zbyt dużej wysokości. Przeprowadzone nieniszczące badania ultradźwiękowe słupów nie wykazały wewnętrznych defektów i potwierdziły dobrą jakość betonu. Wytrzymałość betonu na ściskanie odpowiadała projektowanej, co również potwierdzono w badaniach. Na tej podstawie zdecydowano o naprawie konstrukcji według sposobu zaproponowanego przez wykonawcę.

Słowa kluczowe: elementy masywne, technologia betonowania, defekty betonu, badanie ultradźwiękowe

Abstract: The paper discusses the problem related to the casting of the reinforced concrete supporting structure for the turbine set of the newly built power plant. The analyzed structure consisted of 14 columns connected in the upper part with beams. After casting reinforced concrete massive columns and removing the formwork, numerous surface and deep voids were found. Due to doubts regarding the durability of the structure, the Department of Concrete Structures at the Lodz University of Technology was commissioned

to compile an independent expert opinion. It included an assessment of the homogeneity of the concrete structure as well as the technology of concrete casting and a repair plan developed by the contractor. It was found that the probable reason for the occurrence of the surface defects was the inability to properly cast the concrete mix to the bottom part of the columns due to the high intensity of the reinforcement and the need to cast concrete from too high a height. The conducted ultrasonic pulse tests indicated no internal defects and confirmed good concrete quality. Moreover, destructive tests confirmed the achievement of the designed concrete compressive strength. On this basis, it was decided to repair the structure according to the method proposed by the contractor.

Keywords: massive structures, technology of casting concrete, concrete defects, ultrasonic pulse test