

dr inż. Beata Ordon-Beska^{1*)}

ORCID: 0000-0003-2236-6065

dr hab. inż. Jacek Selejdak, prof. PCz¹⁾

ORCID: 0000-0003-9854-5962

Wpływ wybranych czynników na dokładność oceny zbrojenia płyt żelbetowych metodą elektromagnetyczną

Influence of selected factors on the accuracy of evaluation of RC slabs reinforcement using the electromagnetic method

DOI: 10.15199/33.2023.11.01

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań elektromagnetycznych kilku modeli zbrojenia ortogonalnego z zastosowaniem Profometru PM-650. Oceniono powtarzalność pomiarów w przypadku różnego usytuowania tzw. ośrodka pomiaru względem pręta poprzecznego i oszacowano wartości błędów pomiarowych. Stwierdzono, że pozycja skanera istotnie wpływa na pomiar średnicy, natomiast w mniejszym stopniu na pomiar otuliny. W artykule poruszono również problem wpływu na wyniki czynników zaburzających pole elektromagnetyczne. W efekcie przeprowadzonych badań sformułowano zalecenia praktyczne.

Słowa kluczowe: konstrukcje żelbetowe; badania elektromagnetyczne; dokładność; wpływy zewnętrzne.

Abstract. The article presents the results of electromagnetic research of several models of orthogonal reinforcement. Profometer PM-650 was used. The repeatability of measurements for different locations of the so-called measurement centre relative to the transverse member was evaluated and the values of measurement errors were estimated. It was found that the position of the scanner significantly affects the measurement of the diameter, while the measurement of the coating affects to a lesser extent. The article also discusses the problem of influencing the results of electromagnetic field disruptors. Practical recommendations were formulated.

Keywords: reinforced concrete structures; electromagnetic research; accuracy; external influences.

Metoda elektromagnetyczna wykrywania i oceny zbrojenia konstrukcji żelbetowych jest powszechnie stosowana przy sporządzaniu ekspertyz i kontroli robót [1 – 5]. Metody i urządzenia badawcze są wciąż rozwijane i ulepszane [6 – 9], choć ich dokładność jest różna [10]. W stosowanych współcześnie urządzeniach wykorzystuje się metodę prądów wirowych, strumienia rozproszenia albo metodę pomiaru zmian pola elektromagnetycznego [7, 9]. Nowoczesne urządzenia wyposażone są w wielocewkowe sondy wytwarzające pole elektromagnetyczne o różnej częstotliwości [11], co pozwala na jednoczesne badanie średnicy prętów i ich otuliny.

Dokładność uzyskiwanych wyników zależy m.in. od prawidłowego ustawienia sondy względem prętów. W przypadku badań na istniejących konstrukcjach, takie ustawienie sondy bywa

trudne do utrzymania, szczególnie w przypadku badania zbrojenia dolnego płyt czy belek. Także kreślenie przebiegu zbrojenia w celu wyznaczenia prawidłowej drogi sondy bywa trudne choćby w przypadku niestaranego ułożenia zbrojenia lub ułożenia prętów na kilku poziomach.

W konsekwencji popełnionych błędów, wyniki pomiaru mogą być obciążone błędami znacznie przekraczającymi błędy podane w instrukcji stosowania przyrządu. Nowoczesne przyrządy mierzą otulinę z dokładnością do kilku milimetrów, np. wg danych producentów otulinę pręta $\varnothing 40$ mm urządzenie Ferroskan PS300 [12] mierzy na głębokości 20 cm z dokładnością do ± 9 mm, a Profometr PM-650 [13] na głębokości 180 mm z dokładnością do ± 4 mm. Można zatem mówić o dokładnym wyznaczaniu grubości otuliny, a w przypadku pomiaru średnicy jest to raczej szacunek. Rozbieżności w wynikach i trudności w ich interpretacji zaobserwowane w praktycznych zastosowaniach badań elektromagnetycznych

skłoniły autorów pracy do przeanalizowania wybranych kwestii związanych bezpośrednio z badaniami.

Warunki wykonywania badań

Z literatury [2, 3, 8] oraz instrukcji przyrządów, w tym Profometru PM-650 [13] wynika, że przed przystąpieniem do badań konieczne jest tzw. wyzerowanie urządzenia, polegające na przyjęciu wartości pola elektromagnetycznego rejestrowanego przez urządzenie „z dala” od badanego elementu konstrukcji i wszelkich innych możliwych źródeł zaburzeń pola, jako poziomu odniesienia. W przypadku Profometru [13] podaje się, że pole wytwarzane przez sondę sięga na odległość 200 mm. Podczas badań zaleca się też zdjęcie biżuterii i zegarka.

Z cytowanej instrukcji [13] wynika również, że pomierzona grubość otuliny będzie różna w przypadku siatki związanej drutem i siatki spawanej. Urządzenie Profometr PM-650 jest przygotowane do pomiaru otuliny siatek związanych drutem, a w przypadku

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji: b.ordon-beska@pcz.pl

spawanych należy wprowadzić korektę. Wynik zależy również od zadeklarowanej na urządzeniu średnicy zbrojenia. Z kolei na wynik pomiaru średnicy ma wpływ rzeczywista grubość otuliny i odległość między prętami. Odległość między prętami ułożonymi poprzecznie w stosunku do prętów mierzonych powinna wynosić minimum 15 cm, a między prętami mierzonymi minimum 5 cm, jeżeli uwzględnia się w analizie sygnału wpływ prętów sąsiadujących lub minimum 13 cm bez uwzględniania tego wpływu. Pomiar należy wykonywać nad prętem, przy ustawieniu skanera równoległe do kierunku tego pręta, a tzw. ośrodek pomiaru powinien znajdować się w połowie odległości pomiędzy prętami biegnącymi do niego prostopadle. Wyrażną przeszkodą do uzyskania miarodajnego wyniku są wszelkie odstępstwa od ortogonalnego ułożenia zbrojenia. Opisane zalecenia świadczą o tym, że **na wynik pomiaru wpływa precyzja badania, konstrukcja elementu i czynniki zewnętrzne nie zawsze możliwe do wyeliminowania.**

Badania modeli zbrojenia

Badania wykonano przyrządem Profometr PM-650. Ich celem było sprawdzenie, jak na wyniki pomiaru średnicy i grubości otuliny wpływa przesunięcie pozycji skanera względem pozycji rekomendowanej w instrukcji [14]. Użyto trybu pomiaru „skrzyżowanego” i zakresu pomiarowego standardowego pozwalającego mierzyć grubość otuliny z dokładnością ± 1 mm, a średnicę z dokładnością ± 1 rozmiar.

W badaniach wykorzystano 8 modeli zbrojenia (bez betonu), które były wykonane z prętów o średnicy górą/dołem (X/Y) $\emptyset 10/\emptyset 12$ i $\emptyset 20/\emptyset 22$, leżących bezpośrednio na sobie. Otulinę prętów (c_{xrzecz} , tabela) zrealizowano przez położenie na nich płyt z materiału nieferromagnetycznego o grubości 25,5 i 42,4 mm, zmierzonej z dokładnością $\pm 0,1$ mm. Pręty tworzyły siatkę o wymiarach oczka 5×5 cm, 10×10 cm,

Wyniki pomiarów Measurement results

Pomiar nr	Typ zbrojenia X/Y	Siatka [cm]	c_{xrzecz} [mm]	Pozycja skanera [mm]	Wyniki pomiarów													
					\emptyset_x [mm]	s_{\emptyset_x} [mm]	n_{\emptyset_x} [%]	\emptyset_y [mm]	s_{\emptyset_y} [mm]	n_{\emptyset_y} [%]	c_x [mm]	$c_x - c_{xrzecz}$ [mm]	s_{c_x} [mm]	n_{c_x} [%]	c_y [mm]	$c_y - c_{yrzecz}$ [mm]	s_{c_y} [mm]	n_{c_y} [%]
1	$\emptyset 10/12$	5	25,5	0	20	0,41	2	25	1,1	4,2	24,8	-0,7	0,8	3,2	25,6	-11	0,8	3,1
2a	$\emptyset 10/12$	10	25,5	25	18	1,13	6,3	-	-	-	25,9	0,4	0,5	1,9	29,3	-6,2	0,6	2
2b	$\emptyset 10/12$	10	25,5	0	17	0,95	5,6	20	1,2	5,9	25,6	0,2	0,5	1,9	29,5	-6	0,7	2,4
3a	$\emptyset 10/12$	15	25,5	50	17	0,6	3,6	-	-	-	23,9	-1,6	0,9	3,4	28,1	-7,4	1	3,6
3b	$\emptyset 10/12$	15	25,5	25	14	0	0	15	0,6	3,8	23,5	-2	0,8	3,4	34,2	-1,3	0,6	1,8
3c	$\emptyset 10/12$	15	25,5	0	14	0,51	3,6	14	0	0	23,4	-2,1	0,7	3	31,9	-8,2	0,6	1,9
4	$\emptyset 10/12$	5	42,4	0	20	0,51	2,6	24	0,4	1,8	42,5	0,3	1,1	2,6	43,3	-9,1	1,8	4,2
5a	$\emptyset 10/12$	15	42,4	50	18	1,21	6,6	20	-	-	45,9	3,5	0,4	0,9	50,8	-1,6	0,9	1,8
5b	$\emptyset 10/12$	15	42,4	25	17	0,52	3	16	-	-	45,7	3,3	0,3	0,7	53,3	-0,9	0,9	1,7
5c	$\emptyset 10/12$	15	42,4	0	14	0	0	16	0,6	3,9	45,9	3,5	0,5	1,1	54,1	-1,7	0,8	1,5
6a	$\emptyset 20/22$	15	25,5	50	29	1,11	3,7	-	-	-	24,8	-0,7	0,6	2,4	31,7	-13,8	1,2	3,8
6b	$\emptyset 20/22$	15	25,5	25	25	0,97	3,9	-	-	-	24,5	-1	0,8	3,3	35,7	-9,8	2,2	6,2
6c	$\emptyset 20/22$	15	25,5	0	23	1,24	5,4	29	0,8	2,8	25	-0,5	1,1	4,4	39,4	-6,1	1,1	2,8
7a	$\emptyset 20/22$	20	25,5	75	29	1,62	5,6	-	-	-	26,7	4,7	0,7	2,6	33,8	-11,7	1,5	4,4
7b	$\emptyset 20/22$	20	25,5	50	24	1,36	5,6	-	-	-	26,8	5,1	0,7	2,6	40,1	-5,4	3,9	9,7
7c	$\emptyset 20/22$	20	25,5	25	22	0,97	4,5	26	2,4	9,3	27,3	7	0,6	2,2	47	1,5	3,4	7,2
7d	$\emptyset 20/22$	20	25,5	0	21	0,44	2,1	26	2,4	8,9	27,5	7,8	0,8	2,9	49,3	3,8	4,2	8,5
8	$\emptyset 20/22$	15	42,4	0	26	0,41	1,6	29	0,1	0,3	43,1	7,7	0,4	0,9	54,9	-7,5	0,4	0,7

15×15 cm i 20×20 cm. Wszystkie informacje o wariantach zbrojenia zebrane są w tabeli. Układ prętów w pomiarach nr 3 oraz $5 \div 8$ spełniał wszystkie wymagania konieczne do uzyskania właściwej dokładności wyników. Pomiar nr 1, 2 i 4 nie spełniały wymagania minimalnej odległości niezbędnej do zbadania średnicy prętów (rozstaw prętów poprzecznych względem pręta badanego minimum 15 cm), dlatego należało się liczyć ze znacznym jej przeszacowaniem. Spełniały natomiast wymagania dotyczące grubości otuliny i rozstawu prętów, warunkujące wykonanie dokładnego pomiaru otuliny. Wartości podane w kolumnie „Pozycja skanera” oznaczają przesunięcie ośrodka pomiaru względem jego prawidłowego położenia – wartość „0” – położenie zgodne z instrukcją, a np. wartość „25” – przesunięcie względem tej pozycji o 25 mm.

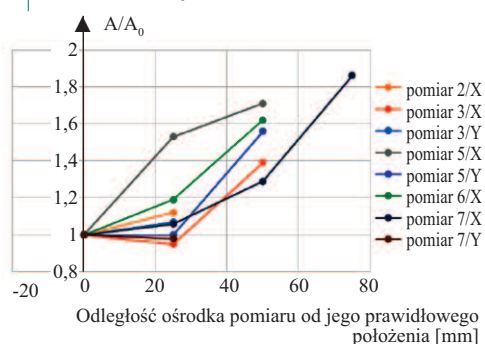
Wyniki badań i ich analiza

W każdym z pomiarów wykryte zostały wszystkie pręty w każdej z warstw. W tabeli podano średnią wartość średnicy (\emptyset_x i \emptyset_y) i otuliny prętów w obu kie-

runkach (c_x i c_y) oraz ich odchylenia standardowe i współczynniki zmienności.

Na każdej warstwie modelu zbrojenia badanie przeprowadzono w 9 \div 30 punktach pomiarowych w zależności od wielkości siatki. W przypadku pomiarów 2a, 3a, 6a, 6b, 7a i 7b średnica nie została określona na żadnym z prętów kierunku Y (leżących głębiej), a w przypadku pomiarów 5a i 5b określono ją tylko w jednym punkcie. Średnica w przypadku kierunku X została określona prawie we wszystkich punktach. Małe wartości odchylenia standardowego i współczynnika zmienności świadczą o dokładności wyników, ale wykazane średnice prętów na ogół odbiegają od rzeczywistych. Największe różnice pomiędzy rzeczywistą i zmierzoną średnicą zanotowano w układach prętów $\emptyset 10/\emptyset 12$ w siatkach o oczkach 5 i 10 cm przy otulinie 25,5 mm oraz w obu układach prętów przy otulinie 42,4 mm. Najlepsze rezultaty uzyskano w pomiarach 3b, 3c i 5c, ponieważ odchylenie pozycji skanera o 2,5 cm nie wpłynęło w istotny sposób na pomiar średnicy zbrojenia w obu kierunkach. Taki sam efekt jest widoczny w przypadku

zbrojenia $\varnothing 20/\varnothing 22$ przy wielkości oczka 20 cm. Na rysunku 1 przedstawiono wpływ odchylenia pozycji skanera od pozycji rekomendowanej na powierzchnię przekroju pręta w kierunku X oraz Y, wynikającą ze zmierzonej średnicy, odniesioną do powierzchni uzyskanej przy prawidłowym położeniu skanera. Z wyjątkiem pomiarów 5X przeszacowanie powierzchni prętów, przy przesunięciu skanera o 25 mm, nie przekracza 20%, a przy większym przesunięciu wynosi więcej niż 20%. Należy zauważyć, że wraz ze wzrostem średnicy prętów dokładność pomiaru jest większa. W przedstawionych badaniach zauważono również przeszacowanie zmierzonej średnicy w porównaniu z rzeczywistą i wynikające z tego przeszacowanie powierzchni pręta, istotne ze względu na bezpieczeństwo konstrukcji. Na znaczenie dokładności wyznaczenia średnicy zwrócono uwagę również w [4]. Jest ona szczególnie ważna przy ocenie prętów cienkich. Błędna ocena średnicy pręta $\varnothing 6$ o +1 mm skutkuje zawyżeniem powierzchni przekroju o ponad 30%, podczas gdy błąd równy -1 mm w przypadku pręta $\varnothing 40$ powoduje zaniżenie powierzchni tylko o ok. 5%.



Oznaczenia: A – wynikowa powierzchnia przekroju pręta; A_0 – wynikowa powierzchnia przekroju pręta przy prawidłowym położeniu skanera
 A – resulting cross-sectional area of the rebar;
 A_0 – the resulting cross-sectional area of the rebar at the correct position of the scanner

Rys. 1. Wpływ położenia ośrodka pomiaru na powierzchnię przekroju pręta

Fig. 1. Influence of the position of the measuring centre on the area of the rebar cross-section

Nominalna powierzchnia prętów została porównana z powierzchnią uzyskaną z pomiaru wykonanego przy ustawieniu skanera zgodnie z instrukcją, ponieważ jak wykazano wcześniej, inne ustawienia skanera generowały zwiększenie błędów pomiarowych. Przy niespełnieniu

warunku minimalnego rozstawu prętów ułożonych poprzecznie względem pręta mierzonego przeszacowanie powierzchni okazało się znaczne. W przypadku pomiaru 1 i kierunku zbrojenia X uzyskano powierzchnię przekroju pręta prawie czterokrotnie większą niż nominalna. Rozbieżności były znacznie mniejsze przy spełnieniu tego warunku, niemniej jednak w pomiarach nr 3c i 5c na prętach $\varnothing 10$ powierzchnia prętów jest ok. dwa razy większa niż nominalna przy zawyżeniu średnicy o 4 mm. W przypadku prętów $\varnothing 20$ przeszacowanie jest mniejsze i wynosi 12% w pomiarze 7d oraz 72% w pomiarze 8 przy zawyżeniu średnicy odpowiednio o 1 i 6 mm. Z porównania parametrów zbrojenia wynika, że mniejsze rozbieżności notuje się przy większej średnicy prętów, cieńszej otulinie i większej odległości pomiędzy prętami – także badanymi. Podobne obserwacje opisano w [4]. Uważamy, że do przyczyn takiego stanu rzeczy należą również „inne zakłócenia”, do których zaliczyć można warunki otoczenia mogące wpływać na rejestrowane wartości pola elektromagnetycznego.

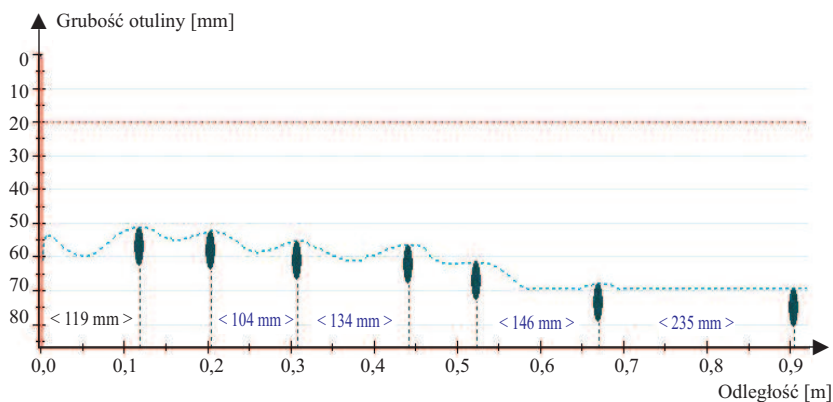
Ocena statystyczna pomiarów otuliny wykazuje dobrą powtarzalność wyników z wyjątkiem wartości uzyskanych w pomiarach 7b ÷ 7d na prętach o średnicy 22 mm w kierunku Y. W tych pomiarach różnica pomiędzy minimalną i maksymalną grubością otuliny była największa i wyniosła odpowiednio 16, 11 i 14 mm. Różnica pomiarów otuliny względem wartości rzeczywistych nie zawsze mieściła się w granicach błędów pomiarowych. W pomiarach 1 i 4, wykonanych na siatkach o oczkach 5 cm, widać podobną wartość średniej grubości w przypadku kierunku X i Y. Różnica grubości otuliny nie przekroczyła 1 mm. Badanie wykazało zatem pręty z różnego kierunku leżące na tym samym poziomie. Wraz ze wzrostem wielkości oczka siatki i z oddalaniem się ośrodka pomiaru od prętów poprzecznych różnica grubości otuliny w obu kierunkach zwiększa się, a w pomiarach 3b i 7c jest bliska średnicy zbrojenia X. Z danych zamieszczonych w tabeli wynika, że bliższa rzeczywistej jest otulina zbrojenia leżącego płyciej. Różnice pomiędzy wartościami zmie-

rzonymi w przypadku kierunku X w pomiarach 2a, 2b, 3a÷3c, 5a÷5c i 6a÷6c wskazują, że pozycja skanera nie wpłynęła w istotny sposób na pomiar grubości otuliny. Natomiast w przypadku pomiaru nr 7 (zbrojenie na głębokości 42,4 mm) wynik pomiaru najbliższy rzeczywistej grubości otuliny uzyskano przy największym przesunięciu skanera względem zalecanego położenia. Przy zbrojeniu w kierunku Y wartości zmieniają się dość chaotycznie, co nie pozwala na wyciągnięcie jakichkolwiek wniosków.

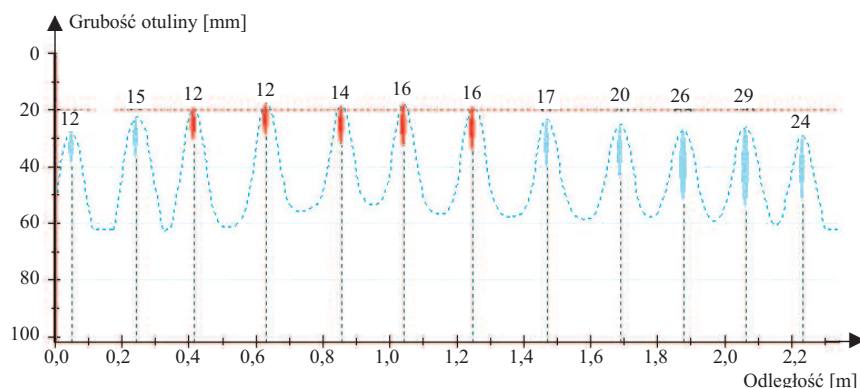
Badania konstrukcji

Badanie klatki schodowej wykonano na spodniej stronie biegu przez całą jego szerokość, w środku rozpiętości i na całej długości podciągów podpierających bieg [15]. Były to schody płytowe trójprzęsłowe. Z dostępnej dokumentacji wynika, że zbrojenie głównego biegu składało się z prętów $\varnothing 12$ co 14 cm, a zbrojenie rozdzielcze z prętów $\varnothing 6$ co 30 cm. Zbrojenie główne miało otulinę 20 mm. W zbadanym fragmencie biegu nie było zbrojenia górnego, które mogłoby wpływać na wartość mierzonego sygnału. Dolne zbrojenie podciągów składało się, wg projektu, z dwóch prętów $\varnothing 20$, a strzemiona na całej długości belek rozmieszczone były ze stałym rozstawem odpowiednio 19 i 27 cm. Otulina podana na rysunkach 2 i 3 wynosiła 20 mm.

Wyniki badań znacznie różniły się od danych projektowych. Pręty biegu zlokalizowane zostały w nieregularnych rozstawach, a ich średnica nie została określona (rysunek 2). Pomiar „skrzyżowany” wykazał grubszą niż projektowana otulinę oraz płyciej położone zbrojenie rozdzielcze. Dodatkowo, grubość otuliny zwiększała się zauważalnie w kierunku duszy schodów. Powodem takich zmian mogło być niestandardne wykonawstwo lub wzmocnienie sygnału spowodowane przez barierki schodów, ewentualnie inne elementy wyposażenia klatki schodowej. Badanie podciągów również wykazało układ zbrojenia inny niż w projekcie (rysunek 3). Rozstaw strzemion zmierzony na bocznej powierzchni belki był mniejszy niż projektowany, co może być wynikiem zmian wprowadzonych do projektu. Za-



Rys. 2. Wyniki pomiarów zbrojenia biegu schodowego
 Fig. 2. Measurements results of flight of stairs reinforcement



Rys. 3. Wyniki pomiarów strzemion podciągu
 Fig. 3. Measurements results of the subthing strups

rejestrowano rozstaw dość powtarzalny, z zagęszczeniem w odcinkach skrajnych. Wykazana w badaniu średnica strzemion wyniosła 12–29 mm i zwiększała się, rosnąc od lewej do prawej strony. Kilka strzemion od prawej strony miało również zwiększoną wyraźnie grubość otuliny. Badania kontrolne na drugiej bocznej powierzchni podciągu i na powierzchni spodniej nie przyczyniły się do wyjaśnienia problemu. Z kolei zmierzona średnica zbrojenia podłużnego dochodziła nawet do 40 mm (granica zakresu pomiarowego), co nie może zgadzać się ze stanem faktycznym.

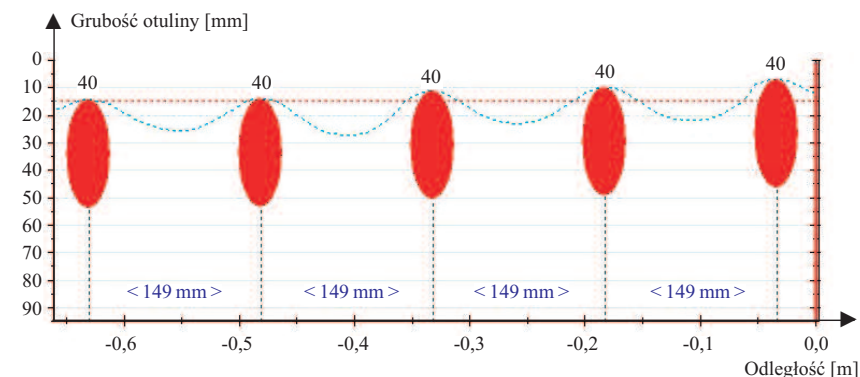
Opisane zróżnicowanie wyników pomiaru średnicy i otuliny zbrojenia podciągu nie jest uzasadnione względami konstrukcyjnymi, choć pewien wpływ na wyniki może mieć układ schodów i kotwienie w podciągu zbrojenia biegu oraz spocznika. W naszej ocenie, w przedstawionym przykładzie zaistniał dodatkowy czynnik, a mianowicie wpływ windy zainstalowanej w obrębie klatki schodowej na wartość mie-

rzanego sygnału. Wniosek taki nasuwa się na podstawie porównania wyników uzyskanych w przypadku opisanego podciągu usytuowanego w pobliżu windy i podciągu na połączeniu biegu oraz drugiego spocznika. Wyniki pomiarów zarówno grubości otuliny, jak i średnicy zbrojenia zmierzone na tym podciągu są inne niż w projekcie, ale zdecydowanie bardziej regularne. Wyniki te nie zostały zweryfikowane w odkrywcę, ponieważ opisana konstrukcja nie była przedmiotem ekspertyzy. Naszym zdaniem przedstawiony przypadek ilustruje typowy problem, z jakim można się spotkać podczas badań zbrojenia metodą elektromagnetyczną.

Badanie daszku nad wejściem do budynku pracującym jak wspornik. Wysokość betonowego przekroju wynosiła od 10 cm przy zamocowaniu do 5 cm przy krawędzi. Zbrojenie o średnicy 10 mm usytuowane było na stałej głębokości, mierząc od dolnej powierzchni płyty: 3 cm – zbrojenie rozdzielcze i 4 cm – zbrojenie główne. Położenie zbrojenia i jego średnica zosta-

ły zweryfikowane na innym daszku, który uległ zniszczeniu. Pręty zostały zlokalizowane w regularnym rozstawie, a grubość otuliny zbrojenia rozdzielczego (płycej usytuowanego przy pomiarze od spodu) wynosiła 28,5 mm, a skrajne wartości 27 i 31 mm. Średnica zbrojenia została natomiast zmierzona z dużym błędem. Maksymalna wykazana wartość wyniosła 31 mm – zbrojenie rozdzielcze i 40 mm (granica zakresu pomiarowego) – zbrojenie główne. Na wyniki pomiaru średnicy wpłynęła blacha stalowa położona na górnej powierzchni daszku pod izolacją przeciwwodną. Nie miała ona natomiast wpływu na pomiar grubości otuliny. Wniosek taki wydaje się uprawniony na podstawie analizy wyników pomiarów na modelach zbrojenia nr 1 i 4 z tabeli.

Badanie prefabrykowanej płyty ogrodzeniowej. Wykonano badanie dwóch płyt (tzw. płót betonowy) o grubości 6 cm. Płyty zbrojone były siatką o oczku 15 cm i nieznannej średnicy prętów. Rozstaw zbrojenia został określony prawidłowo, jako regularny równy 15 cm. Zmierzona otulina prętów przy grubości płyty 6 cm wyniosła 1 cm. Największe zastrzeżenia wzbudziła średnica prętów widoczna na rysunku 4, równa górnej wartości zakresu pomiaru średnicy (40 mm), podczas gdy w tego typu elementach zbrojenie ma średnicę do 6 mm. Oznacza to, że wartość rejestrowanego sygnału elektromagnetycznego była bardzo wysoka. Przyczyną wskazania tak dużej średnicy nie jest błędne ustawienie skanera, ponieważ pomiar poprzedzony był ustaleniem położenia prętów siatki. Po zakończeniu badań przeprowadzono również kontrolę wskazań w warunkach laboratoryjnych, która nie wykazała złego działania urządzenia. Za badanymi płytami była wolna przestrzeń, a więc nie istniały żadne dodatkowe elementy ferromagnetyczne mogące mieć wpływ na wyniki. Jedynej możliwej przyczyny takiej sytuacji należy upatrywać w istnieniu zewnętrznego pola elektromagnetycznego, którego źródłem była linia wysokiego napięcia znajdująca się nad płotem oraz transformatorownia usytuowana w odległości 4 m od niego.



Rys. 4. Wyniki pomiarów zbrojenia płyty ogrodzeniowej
 Fig. 4. Results of measurements of the reinforcement of the fence slab

Podsumowanie i zalecenia praktyczne

Na podstawie analizy wyników pomiarów wykonanych na modelach zbrojenia i opisanych konstrukcjach oraz doświadczenia badawczego wyciągnięto następujące wnioski. Na wynik pomiaru wpływa precyzja badania, konstrukcja elementu i czynniki zewnętrzne nie zawsze możliwe do wyeliminowania.

Badania należy poprzedzić szczegółową analizą wszelkiej dokumentacji dotyczącej badanego elementu, co ułatwi wytypowanie właściwych miejsc pomiarowych ze względu na jego konstrukcję i obciążenia. Istotne są: średnice prętów i grubość otuliny; sposób łączenia prętów; liczba warstw; rozstaw prętów i ich układ geometryczny.

Ze względu na różne warunki kalibracji urządzenia przez producenta i panujące podczas badania należy liczyć się z błędami większymi niż podane w instrukcji. Zaleca się wykonywanie własnych badań kontrolnych urządzenia przed przystąpieniem do pomiarów i po ich zakończeniu w celu przeprowadzenia kontroli jego działania. „Wyzeroowanie” urządzenia powinno być wykonane w odległości ok. 1 m od źródeł zaburzeń pola elektromagnetycznego oraz elementu. Należy również zwrócić uwagę na wszelkie urządzenia osobiste wytwarzające pole elektromagnetyczne oraz na elementy ubioru.

W przypadku badania obiektów, przy których w bliskiej odległości składowane są materiały o właściwościach ferromagnetycznych lub przy których funkcjonuje infrastruktura wytwarzająca pole elektromagnetyczne, wskazane byłoby zbadanie wartości pola w ce-

lu oceny, czy może mieć ono istotny wpływ na wyniki.

Na wynik pomiaru grubości otuliny wpływa zadeklarowana średnica prętów, co zostało zweryfikowane również w [16]. Zaleca się wykonanie odkrywki w celu kalibracji urządzenia. Jest to uzasadnione nawet w przypadku urządzeń, które mierzą zarówno średnicę prętów, jak i grubość otuliny. Wykonanie odkrywki ma znaczenie tym większe, że różnica pomiaru średnicy wynosząca ± 1 mm może dać w rezultacie znaczne różnice powierzchni przekroju zbrojenia, a to przekłada się na ocenę poziomu bezpieczeństwa pracy konstrukcji. W przypadku badania zbrojenia wielowarstwowego lub wyników, które nie mają wiarygodnego uzasadnienia, zaleca się wykonanie odkrywki kontrolnej oraz przeprowadzenie badania skanem ultradźwiękowym lub badaniem radiograficznym.

Otulina zbrojenia siatkowego powinna być ustalana na podstawie pomiarów wykonanych na płytce leżących prętach, ponieważ wynik pomiaru na prętach głębiej zamontowanych może być istotnie zaniżony przede wszystkim w przypadku prętów cienkich i siatek o małych oczkach. Odchylenie położenia skanera od pozycji zalecanej nie wpływa znacząco na wynik pomiaru otuliny prętów płytszej warstwy (badania modelowe), ale wpływa wyraźnie na wynik pomiaru średnicy. Dlatego pozycję skanera należy ustalać zgodnie z instrukcją i możliwie starannie.

Wyniki pomiarów na skrajnych prętach siatek lub na prętach granicznych przy znacznej zmianie rozstawu nie są miarodajne, dlatego zaleca się nie uwzględniać ich w analizie wyników.

Literatura

- [1] P Cirkle et al., Non-destructive diagnostics of steel-reinforced concrete structures: Detecting and locating reinforcement, 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 549 012010, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/549/1/012010>, dostęp: 1.05.2023.
- [2] Kossakowski P. Zastosowanie metody elektromagnetycznej w detekcji zbrojenia konstrukcji żelbetowych z wykorzystaniem urządzenia Ferroskan, w: Diagnostyka budowlana. Wybrane metody badania materiałów, elementów i konstrukcji, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2019, str. 41 – 50.
- [3] Salman AA. Non-Destructive Test of Concrete Structures Using: FERROSCAN, Engineering Technology Journal, 29, 2011, str. 2933 – 2941.
- [4] Urbanowicz D, Warzocha M. Wykorzystanie urządzeń ferromagnetycznych w diagnostyce konstrukcji budowlanych. Przegląd Budowlany. 2015; 5: 32 – 35.
- [5] Ordon-Beska B. Badanie metodą elektromagnetyczną zbrojenia stropów monolityczno-prefabrykowanych parkingów, Materiały Budowlane. 2022; 12 (604): 10 – 13.
- [6] Drobiec Ł, Jasiński R, Piekarczyk A. Sposoby lokalizacji stali zbrojeniowej w konstrukcjach żelbetowych. Metoda elektromagnetyczna (cz. II). Przegląd Budowlany. 2007; 12: 31 – 37.
- [7] Chady T, Runkiewicz L, Sikora R, Wójtowicz S. Lokalizacja zbrojenia w budowlanych elementach żelbetowych. 31 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących. Szczyrk, 2002, str. 233+236.
- [8] De Alcantara NP, Costa DC, Guedes DS, Sartori RV, Bastos PSS. A Non-Destructive Testing Based on Electromagnetic Measurements and Neural Networks for the Inspection of Concrete Structures, Advanced Materials Research. 2011; 301–303: 597 – 602.
- [9] Lewińska-Romicka A. Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2001.
- [10] Raczkiewicz W, Wójcicki A. Wybrane metody lokalizacji zbrojenia w żelbetowych elementach konstrukcji, w: Diagnostyka budowlana. Wybrane metody badania materiałów, elementów i konstrukcji, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2019, str. 27 – 40.
- [11] Drobiec Ł, Jasiński R, Piekarczyk A. Lokalizacja wad konstrukcji i stali zbrojeniowej – metody. XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji Szczyrk, 8÷11 marzec 2006, str. 133-210.
- [12] PS 300 Original operating instructions.
- [13] Profometer. Operating instructions. Proceq SA. 2017.
- [14] Profometr PM-6. Instrukcja obsługi. Proceq – Szwajcaria, Viateco Sp. z o. o., maj 2018 r.
- [15] Ordon-Beska B. Ocena parametrów zbrojenia metodą elektromagnetyczną przy użyciu profometru PM-650, w: Diagnostyka budowlana. Wybrane metody badania materiałów, elementów i konstrukcji, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2019, str. 51-67.
- [16] Wiwatrojanagul P, Sahamitmongkol R, Tangtermsirikul S. A method to detect lap splice in reinforced concrete using a combination of covermeter and GPR. Construction and Building Materials. 2018; 173 (2018): 481 – 494.

Przyjęto do druku: 24.10.2023 r.