

Pale iniekcyjne zbrojone rurą stalową jako konstrukcja zespolona – uwagi krytyczne

dr inż. Henryk Pachla, KROZ – Henryk Pachla

W praktyce inżynierskiej, a w szczególności w starych strukturach zabytkowych, często występuje problem niedoboru nośności istniejących fundamentów. Szczególnie szerokie zastosowanie do zwiększenia nośności fundamentów znalazły pale iniekcyjne (mikropale).

Pale takie są wykonywane maszynami o niewielkich gabarytach z poziomu piwnic i doskonale zastępują tradycyjne technologie podbijania fundamentów. Posiadają istotną dla wybudowanych, często przed setkami lat, budowli cechą statycznego włączenia się do współpracy dopiero w momencie wystąpienia przemieszczeń wzmacnianego fundamentu.

Pomimo szerokiego zastosowania pali iniekcyjnych w praktyce inżynierskiej, dopiero od niedawna technologia ta ujęta została w polskich normach. Norma PN-EN 14199 [1] ujmuje podstawy projektowania i wykonawstwa mikropali na bazie iniekowanego zaczynu cementowego, zaprawy czy betonu.

Wprowadzenie

O ile zagadnieniu pali betonowych poświęcono szereg prac o charakterze badawczym, a sam beton jest materiałem dość dobrze przebadanym, o tyle dla pali iniekcyjnych tego rodzaju prace należą do rzadkości. Brak badań dotyczy nie tylko zachowania się pali w gruncie, ale także ich struktury oraz samego zaczynu cementowego jako materiału konstrukcyjnego.

Z uwagi na parametry wytrzymałościowe zaczynu cementowego istotnego znaczenia nabiera zbrojenie pala. Norma [1] dopuszcza zbrojenie prętami zbrojeniowymi, kształtownikami z otworem (np. rurami) lub wyrobami walcowanymi na gorąco.

W praktyce projektowej często stosowane są rury perforowane o średnicy 76,1 mm. Na obszarze starego Krakowa zrealizowanych zostało wiele wzmocnień posadowienia w tej technologii. Podczas wykonywania odkrywek fundamentów dla celów badawczych natrafic można na pale wykonane w przeszłości. W przypadku pali zbrojonych rurą perforowaną najczęściej otulina rury jest od niej odspojona (ryc. 1).



Ryc. 1. Przykłady odkopanych mikropali zbrojonych rurami stalowymi

Ponieważ obciążenie na grunt jest przenoszone przez siły tarcia na pobocznicę pala, to przy zniszczonej otulinie staje się on bezużyteczny.

Polska norma [1] wskazuje, że przy projektowaniu mikropali należy stosować zasady zawarte m.in. w normie do projektowania konstrukcji zespolonych EN 1994-1-1 [2].

W warunkach zespolenia uważa się, że słup zespolony nie powinien ulec rozwarstwieniu przed osiągnięciem stanu granicznego nośności. Ograniczenie różnicy odkształceń betonu i stali na powierzchni zespolenia uzyskuje się przez użycie łączników.

W stosowanych w praktyce inżynierskiej palach iniekcyjnych zbrojonych rurą nie stosuje się łączników z przyczyn praktycznych. Wykonywana jest jedynie perforacja stalowej rury, którą nie można zastąpić łączników.

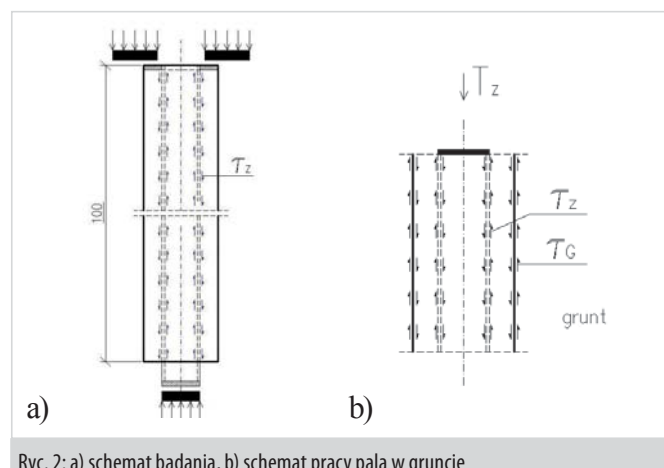
Polska norma PN-B-03300 [3] (pkt. 6.2.4 *Warunki zespolenia stali i betonu*) podaje wartości granicznej wytrzymałości obliczeniowej na ścinanie na styku stali i betonu w elementach zespolonych. Przy naprężeniach stycznych mniejszych od tej wartości stosowanie łączników nie jest wymagane.

W opisywanych warunkach nie przewidziano rury obetonowanej, a jedynie rury wypełnione betonem.

Dodatkowo dla elementów zespolonych, w których rolę betonu zastąpiono zaczynem cementowym lub zaprawą, brak jest danych eksperymentalnych, aby podać analogiczny parametr wytrzymałościowy, jak to ma miejsce w przypadku betonu. Brakuje zatem podstaw merytorycznych do stwierdzenia poprawności technologii wykonania pali zbrojonych rurą.

Rezultaty badań pilotażowych

W celu weryfikacji przydatności rur perforowanych jako zbrojenia pali iniekcyjnych wykonano serię badań zespolenia rura – iniekt cementowy. Próbkę o przekroju poprzecznym 120 x 120 oraz 150 x 150 mm i długości 1 m, z zatopioną centrycznie w iniektie cementowym rurą perforowaną o średnicy 76,1 mm, poddano osiowemu ścisaniu według schematu jak na rycinie 2a. Przy doborze geometrii próbek kierowano się wymiarami średnic pali najczęściej stosowanych w praktyce inżynierskiej. W przeszłości najczęściej stosowana była średnica pali 120 mm. Wraz z rozwojem maszyn wiertniczych możliwe stało się wykonywanie pali o większych średnicach. Obecnie najczęściej stosowaną średnicą jest 150 mm. Przekrój kwadratowy próbek dobrano w taki sposób, aby ograniczyć obszar inicjacji zniszczenia do obszaru minimalnego otulenia części stalowej.



Ryc. 2: a) schemat badania, b) schemat pracy pala w gruncie



Ryc. 3. Próbkę w maszynie wytrzymałościowej przed i po zniszczeniu

Polska norma PN-EN 14199 [1] wskazuje, że stosunek w/c dla iniektu stosowanego w mikropalach nie powinien być większy niż 0,55. Dla celów badawczych przyjęto zaczyn o w/c równym 0,5. Eksperyment dla obu rodzajów próbek przeprowadzono każdorazowo na serii 30 próbek. Badania te zostały przeprowadzone w laboratorium firmy KROZ – Henryk Pachla i były finansowane ze środków własnych.

Proces obciążania prowadzono do momentu utraty spójności na powierzchni zespolenia i rozpadnięcia się otuliny rur

z zaczynu cementowego. Na rycinie 3 pokazano badane próbki przed obciążeniem i po osiągnięciu siły rozwarstwiającej rurę stalową od zaczynu cementowego.

Na rycinie 4 przedstawiono różne formy zniszczenia badanych próbek.

Tabela 1 zawiera wyniki badań. W kolumnach 2 i 5 przedstawiono siły niszczące zespolenie (T_z) dla poszczególnych próbek, w kolumnach 3 i 6 – naprężenia (τ_z) odpowiadające tym siłom na powierzchni poboczniczy zewnętrznej rur stalowych, wyzna-

Tab. Zestawienie wyników badań dla próbek 120 x 120 i 150 x 150

Nr próbki	Próbki 120 x 120			Próbki 150 x 150		
	Siła T_z [kN]	τ_z [kPa]	τ_g^{120} [kPa]	Siła T_z [kN]	τ_z [kPa]	τ_g^{150} [kPa]
Kol. 1	2	3	4	5	6	7
1	21,05	88,08	55,84	42,11	176,19	89,41
2	24,54	102,68	65,09	44,87	187,74	95,27
3	27,43	114,77	72,76	51,97	217,45	110,34
4	28,39	118,79	75,31	54,26	227,03	115,20
5	29,11	121,80	77,21	58,59	245,15	124,39
6	30,44	127,36	80,74	63,40	265,27	134,61
7	32,72	136,90	86,79	67,97	284,39	144,31
8	34,65	144,98	91,91	68,90	288,28	146,28
9	34,89	145,98	92,55	71,70	300,00	152,23
10	35,25	147,49	93,50	73,03	305,56	155,05
11	36,69	153,51	97,32	77,48	324,18	164,50
12	39,25	164,23	104,11	79,04	330,71	167,81
13	40,66	170,13	107,85	80,48	336,74	170,87
14	43,31	181,21	114,88	82,05	343,30	174,20
15	45,23	189,25	119,97	85,78	358,91	182,12
16	45,6	190,79	120,95	86,38	361,42	183,40
17	46,08	192,80	122,23	86,86	363,43	184,42
18	46,44	194,31	123,18	87,34	365,44	185,44
19	46,68	195,31	123,82	91,55	383,05	194,37
20	47,4	198,33	125,73	92,76	388,12	196,94
21	48,12	201,34	127,64	94,44	395,15	200,51
22	51,73	216,44	137,21	95,52	399,66	202,80
23	51,97	217,45	137,85	102,1	427,20	216,77
24	55,58	232,55	147,43	104,50	437,24	221,87
25	58,95	246,65	156,37	113,6	475,31	241,19
26	62,2	260,25	164,99	116,70	488,28	247,77
27	67,73	283,39	179,66	120,2	502,93	255,20
28	70,74	295,98	187,64	121,6	508,79	258,17
29	73,27	306,57	194,35	122,60	512,97	260,30
30	77,36	323,68	205,20	150,90	631,38	320,38

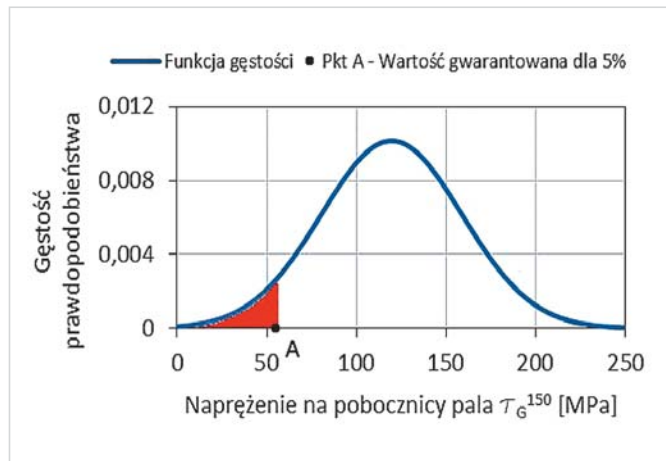


Ryc. 4. Różne formy zniszczenia otuliny z zaczynu cementowego podczas badania

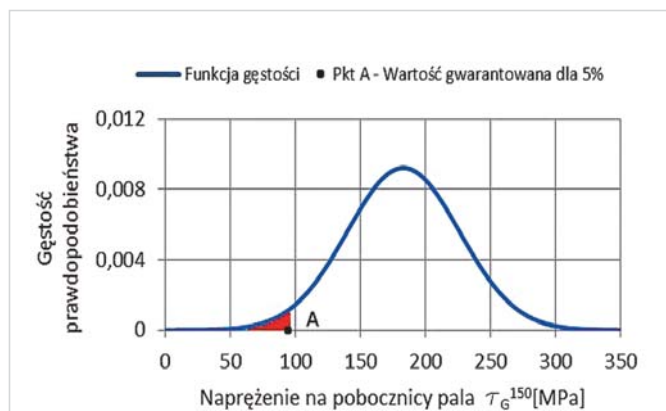
czony z warunku równowagi elementu stalowego. W kolumnach 4 i 7 obliczono naprężenie (τ_c) na poboczniczy pala zanurzonego w gruncie o średnicy odpowiednio 120 i 150 mm w stanie równowagi osiągniętej w momencie zniszczenia zespolenia rury stalowej z otuliną zaczynem cementowym (ryc. 2b).

Dla wartości otrzymanych z eksperymentu obliczono parametry statystyczne (ryc. 5, 6).

Rozrzut wyników badań powoduje, iż istotnym dla bezpieczeństwa konstrukcji jest gwarantowana wytrzymałość zespolenia, ustalająca pewność zespolenia na poziomie 95%.

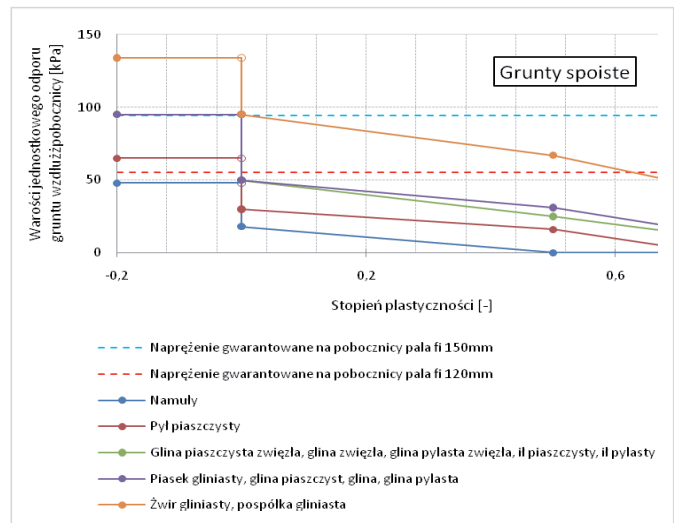


Ryc. 5. Rozkład normalny z badania próbek 120 x 120 mm

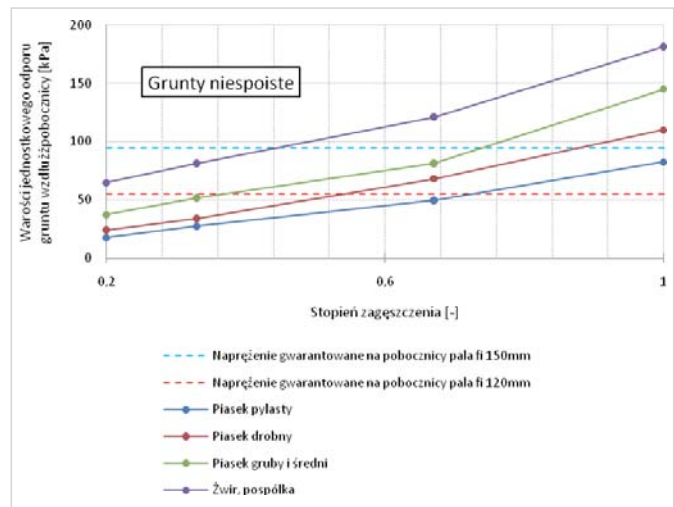


Ryc. 6. Rozkład normalny z badania próbek 150 x 150 mm

Analizując warunki równowagi elementu pala pracującego w gruncie, przenoszącego obciążenie tarciem poboczniczy pala w stanie granicznym, można otrzymać zakres dopuszczalności stosowania pali zbrojonych rurą stalową. Jako warunek



Ryc. 7. Zestawienie gwarantowanej wytrzymałości zespolenia z granicznym odporem gruntu wzdłuż poboczniczy dla gruntów spoiстых [4]



Ryc. 8. Zestawienie gwarantowanej wytrzymałości zespolenia z granicznym odporem gruntu wzdłuż poboczniczy dla gruntów niespoistych [4]

dopuszczalności przyjęto zrównanie gwarantowanej wytrzymałości zespolenia i granicznego oporu gruntu wzdłuż poboczniczy pala [4]. A zatem jest eliminowane zastosowanie pali w gruncie, w którym utrata zespolenia następuje przy naprężeniach niższych niż graniczny opór gruntu – projektowana nośność pala.

Dla poddanych eksperymentowi przypadków: pale iniekcyjne o średnicy 120 mm oraz 150 mm, zbrojone rurami o średnicy 76,1 mm, na rycinach 7 i 8 przedstawiono obszary dopuszczalności zastosowania takich pali dla gruntów spoiстых (ryc. 7) i niespoistych (ryc. 8) na poziomie bezpieczeństwa 95%. W parametrach gruntu uwzględniono współczynnik materiałowy o wartości 1,1.

Obszary pod przerywanymi liniami wyznaczają zakresy, w których o nośności pali decyduje opór gruntu. Obszary nad przerywanymi liniami to zakresy, w których o nośności pali decyduje zespolenie rury z otuliną z zaczynu cementowego.

Uwagi i wnioski końcowe

1. Obecnie brak jest podstaw merytorycznych do projektowania pali iniekcyjnych zbrojonych perforowanymi rurami stalowymi. Teoria konstrukcji zespolonych stawia szereg uwraunkowań, które nie są spełnione dla takiej konstrukcji.



Ryc. 9. Wzmacnianie fundamentów mikropalami

2. Przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych badania pilotażowe potwierdzają bardzo ograniczony obszar stosowalności rur stalowych jako zbrojenia pali. Wykorzystywanie tej technologii można rozważać tylko w gruntach słabych, występujących na całej długości pala, oraz w warunkach gruntowo-wodnych niewpływających na obniżenie parametrów geometrycznych i wytrzymałościowych poboczniczy pala. Ograniczenie do gruntów słabych praktycznie eliminuje tę technologię z zastosowań, np. na terenie Starego Miasta w Krakowie.

3. Analiza stanu technicznego odkopywanych pali oraz procesu powstania odkształceń skurczowych, a w konsekwencji rozwoju uszkodzeń skurczowych w zaczynie cementowym,

będących koncentratorami procesów korozyjnych, wskazuje też na istotny wpływ korozji na wytrzymałość zespolenia rury stalowej z otuliną z zaczynu cementowego.

4. Warunki gruntowo-wodne oraz poziom wilgotności naturalnej gruntu w sposób istotny mogą zawęzić obszar stosowalności analizowanej w niniejszym opracowaniu technologii wykonywania pali iniekcyjnych.

5. Wyniki badań przedstawione w tym artykule mają charakter pilotażowy. W przypadku zastosowań konstrukcji zespolonych złożonych z zaczynu cementowego i stali konieczne jest przeprowadzenie wielu eksperymentów, pozwalających na uzyskanie parametrów mechanicznych zarówno dla zespolenia, jak i dla samego zaczynu cementowego. Dotyczy to również podstawowych przy projektowaniu parametrów, jakimi są wytrzymałość obliczeniowa i częściowy współczynnik bezpieczeństwa.

6. Przeprowadzona w niniejszym artykule analiza ma na celu zwrócenie uwagi na konieczność przestrzegania zarówno norm, jak i podstaw mechaniki. Dotyczy to szczególnie zastosowań w praktyce inżynierskiej technologii mających charakter interdyscyplinarny, w tym przypadku z pogranicza mechaniki konstrukcji i mechaniki gruntów.

WYRAŻAM PODZIĘKOWANIE PROF. DR. HAB. INŻ. ZENONOWI WASZCZYŹYNOWI ZA CENNE UWAGI MERYTORYCZNE ORAZ WSPARCIE PRZY PRACY NAD ARTYKUŁEM.

Literatura

1. PN-EN 14199: *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Mikropale*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2005.
2. EN 1994-1-1, Eurocode 4: *Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules for buildings*. Comité Européen de Normalisation (Europejski Komitet Normalizacyjny), Paryż.
3. PN-B-03300: *Konstrukcje zespolone stalowo-betonowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, sierpień 2006.
4. PN-83/B-02482: *Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.



Ryc. 10. Głowice mikropala zbrojonego prętkami w fundamencie