

Karolina Gorska*, Jarosław Rybak**

BADANIA PRĘDKOŚCI FALI AKUSTYCZNEJ W BETONIE PALI CFA

1. Wprowadzenie

Bezpośrednia kontrola robót fundamentowych często zaburza proces inwestycyjny — wydłuża jego czas, jak również podnosi koszty. Niejednokrotnie wykonawcy robót zależy na skróceniu czasu prowadzenia badań kontrolnych. Dotyczy to głównie badań nośności, gdzie możliwość wykonania badań jest uzależniona zarówno od wytrzymałości tworzywa pala jak i od zjawisk zachodzących w gruncie wokół pala. Odmienny problem stanowi możliwość wykonania badań jakościowych: sprawdzenia ciągłości i długości pala metodą niskoenergetyczną [2]. Różne aspekty badań ciągłości pali wg normy [1] poruszano również w publikacjach [3–5, 10]. Popularną metodą badawczą jest metoda PIT [8, 9] gdzie badanie długości polega na pomiarze czasu powrotu fali akustycznej odbitej od podstawy pala. Za pomocą skalibrowanego młotka wzbudzony zostaje impuls, którego wzbudzenie i odbicie jest rejestrowane przez odbiornik w głowicy pala. Następnie przeprowadza się analizę otrzymanego sygnału. Nieco inaczej przebiega analiza w metodzie Impulse Response S'Mash [11], gdzie analizuje się częstotliwości wzbudzonych drgań. W obydwu metodach możliwe jest wykrycie przewężeń, inkluzji, czy też pęknięć pala. Podstawowym problemem jest jednak zawsze określenie prędkości rozchodzenia się fali w betonie. Prędkość fali opisana zależnością (1) zależy od modułu odkształcenia i gęstości ośrodka.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

W procesie dojrzewania betonu, wraz ze wzrostem jego wytrzymałości wzrasta moduł sprężystości i następuje przyrost prędkości rozchodzenia się fali sprężystej. Ważnym aspek-

* Zakład Budownictwa Wodnego i Geodezji, Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

** Zakład Fundamentowania, Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

tem badań jest również technologia wykonania pala. Wyklucza się praktycznie badanie pali o niejednorodnej strukturze jak przykładowo pali jet-grouting oraz kolumn DSM, w których następuje na tyle duże rozproszenie sygnału, iż nie jest możliwym stwierdzenie, który z powracających sygnałów jest „echem” z postawy pala. Problem ten może również występować w analizie sygnałów z badań pali prefabrykowanych gdzie zaobserwowano istotną różnicę między prędkością pomierzoną w elemencie żelbetowym przed wbiciem ($c = 4500$ w/s) i po udarowym pogrążeniu pala w podłoże gruntowe ($c = 4000$ m/s) [6].

2. Prędkość fali akustycznej w młodym betonie

Problematyka jakości badań ciągłości i długości pali metodą PIT wykonywanych przed czasem potrzebnym na osiągnięcie wytrzymałości tworzywa pala poruszona była w pracy [7] z 2006 r., gdzie przedstawiono wyniki badań 4 pali, które badano 6-krotnie pomiędzy 3 a 25 dniem od betonowania. Zaobserwowano duże rozrzuty prędkości fali w palach w kolejnych dniach i oczekiwany trend do stabilizacji prędkości po 15 dniu od betonowania. Uzyskane wyniki korespondowały z zaleceniami by nie prowadzić badań przed 7 dniem od betonowania i stawiały zarazem w wątpliwość pewność badań w drugim tygodniu.

W celu opracowania wytycznych pozwalających na określenie prędkości fali akustycznej w młodym betonie pali fundamentowych, prowadzone są na Politechnice Wrocławskiej badania laboratoryjne i badania polowe na dużych próbach statystycznych. Istotną trudność stanowi jednak ograniczona możliwość powtarzania badań na tych samych palach w dłuższym okresie czasu. Presja czasu na wykonawcę robót powoduje zazwyczaj, że natychmiast po wykonaniu badań kontrolnych kontynuowane są prace zbrojarskie i betoniarskie, co utrudnia lub wręcz uniemożliwia dostęp do głowic pali. W artykule [14] przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych dla szerokiego spektrum betonów, a w pracach [12, 13] wyniki badań polowych kolumn i pali z betonu C20/25 badanych pomiędzy 5 a 12 dniem od betonowania. Zaobserwowano, że gdy wiek badanych pali nie różni się więcej niż o 5–7 dni to zmianę prędkości fali akustycznej najwygodniej (ze względów praktycznych) opisywać jest za pomocą zależności liniowej. Poszukiwania optymalnego dopasowania funkcji dla czasu między 3 a 28 dniem wskazują, że podobnie jak w przypadku przyrostu wytrzymałości betonu lepsza jest funkcja logarytmiczna.

3. Opis wykonanych doświadczeń

W artykule zaprezentowany zostanie jedyny jak dotychczas program badawczy, w ramach którego przebadano 12 pali przez 8 kolejnych dni – od 6 do 13 dnia od zabetonowania pali. Badania prowadzono na 12 palach o średnicy 800 mm i projektowanej długości 12,5 m, wykonanych w technologii CFA. Rysunek 1 przedstawia widok poletka badawczego.

Rejestracje sygnałów przeprowadzono urządzeniem PIT (rys. 2). Ze względu na okres jesienny i suchą powierzchnię głowic istniała możliwość przyklejenia czujnika (akcelerometru) do wyrównanej i oczyszczonej głowicy badanego pala.

Do wygenerowania sygnału w palu stosowano młotek o masie ok. 1,3 kg. Przykładowy sygnał (przed redukcją szumów) przedstawiono na rysunku 3. Można zaobserwować wy-



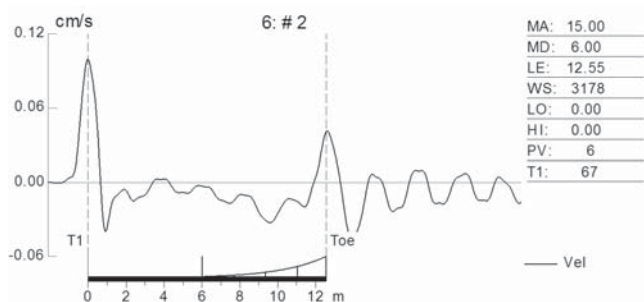
Rys. 1. Widok poletka badawczego — przygotowane głowice pali



Rys. 2. Pile Integrity Tester — głowica pala przygotowana do badań

rażne echo z podstawy pala na głębokości ok. 12,5 m poniżej głowicy. Odpowiadająca tej długości prędkość fali w palu badanym po 9 dniach od betonowania wynosiła 3178 m/s.

Analogiczną analizę przeprowadzono dla 96 sygnałów (12 pali przez 8 kolejnych dni). Wyniki badań potwierdzające spodziewany przyrost prędkości fali w czasie, zestawiono w tabeli 1. Jakkolwiek obserwuje się zmienność wartości obserwacji w kolejnych dniach to trend rosnący jest wyraźny a rozrzut wyników mierzony zaprezentowanym w tabeli 2 współczynnikiem zmienności mieści się w przedziale 3–4%.



Rys. 3. Przykładowy sygnał PIT dla pala o długości 12,55 m (pal nr 18 badany po 9 dniach)

Taka zmienność znajduje potwierdzenie w publikowanych wynikach badań prowadzonych na innych budowach [7, 12, 13]. Należy podkreślić, że obserwowany rozrzut wyników może również wynikać z imperfekcji wykonawczych w zakresie głębokości palowania i nieznacznie różnych poziomów skucia głowic pali.

TABELA 1

Prędkości fali akustycznej obliczone na podstawie sygnałów PIT i metryk pali

Pal nr	Długość	Kolejne dni od betonowania pali							
		dzień 6	dzień 7	dzień 8	dzień 9	dzień 10	dzień 11	dzień 12	dzień 13
	[m]	[m/s]							
13	12,52	3298	3375	3313	3368	3471	3461	3395	3545
14	12,53	3220	3362	3381	3362	3309	3427	3316	3588
15	12,52	3296	3295	3405	3486	3471	3401	3496	3485
16	12,58	3525	3504	3634	3529	3566	3572	3578	3692
17	12,45	3320	3249	3314	3350	3441	3432	3412	3515
18	12,55	3134	3138	3193	3178	3246	3285	3238	3413
19	12,52	3342	3286	3286	3368	3412	3470	3533	3652
20	12,55	3448	3478	3423	3449	3605	3653	3769	3733
21	12,52	3260	3295	3451	3359	3481	3479	3497	3422
22	12,38	3486	3585	3649	3607	3584	3594	3674	3633
23	12,52	3374	3350	3469	3558	3529	3507	3662	3696
24	12,52	3235	3452	3377	3359	3501	3525	3506	3373

Uzyskane na podstawie danych z tabeli 1 — 8 par wyników zależności średniej prędkości fali sprężystej w funkcji czasu od wykonania pala przedstawiono w tabeli 2 i na rysunku 4.

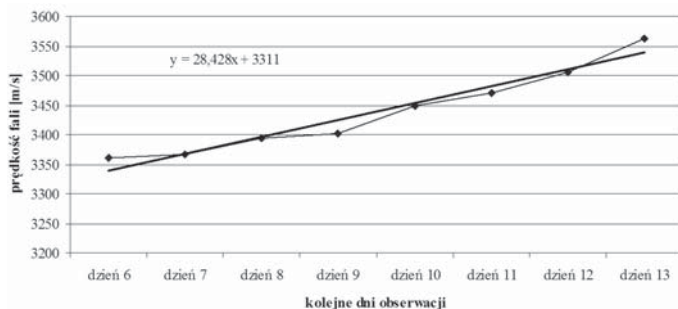
Zależność prędkości fali akustycznej od czasu pomiędzy 6 a 13 dniem od betonowania pala, wyinterpretowaną z „chmury wyników” w tabeli 1 (lub wykresu na rys. 4) opisano równaniem (2):

$$c = 3311 + 28,43 \cdot t \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2)$$

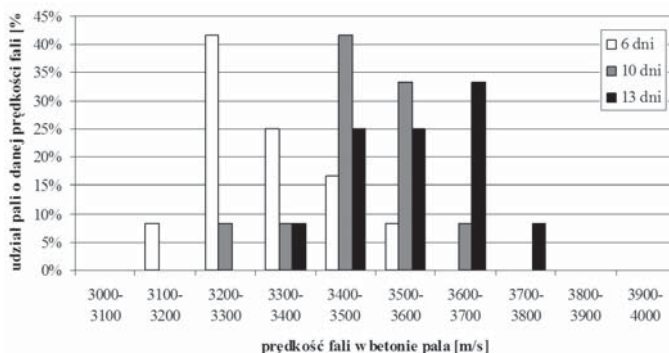
TABELA 2

Wielkości statystyczne w kolejnych dniach od betonowania

	dzień 6	dzień 7	dzień 8	dzień 9	dzień 10	dzień 11	dzień 12	dzień 13
Średnia [m/s]	3360	3367	3393	3403	3449	3470	3506	3562
Odchylenie [m/s]	102,44	120	130	127	127	127	146	117
Współczynnik zmienności	3,05%	3,57%	3,82%	3,73%	3,67%	3,65%	4,17%	3,28%

**Rys. 4.** Zmiana średniej prędkości fali w betonie w kolejnych dniach z linią trendu

Na rysunku 6 przedstawiającym histogramy prędkości dla pali 6, 10 i 13 dniowych (procent pali, dla których obliczono prędkości fali w przedziałach 100 m/s z zakresu 3000–4000 m/s). Wydaje się, że zaobserwowane rozkłady wyznaczonych prędkości w kolejnych dniach od betonowania są zbliżone do rozkładu normalnego, choć teza taka wymagałaby pewnie potwierdzenia na większej próbie statystycznej.

**Rys. 5.** Histogram obserwacji prędkości w wybranych dniach (w przedziałach co 100 m/s)**4. Podsumowanie i wnioski**

Przyspieszenie terminu badań pali, zarówno w aspekcie ich nośności jak i jakości, jest możliwe. Wymaga jednak świadomości zjawisk, jakie zachodzą zarówno w samym palu jak i w jego otoczeniu gruntowym po wykonaniu pala. Konsekwentne gromadzenie danych dla

różnych betonów i czasu od 3–4 dnia po zabetonowaniu, gdy zazwyczaj odsłaniane są głowice pali do czasu ok. 28 dni potrzebnego na osiągnięcie jego pełnej wytrzymałości pozwala na przeprowadzenie procedur kontrolnych przed czasem określonym w normach. Konserwatywne zapisy w normach stoją bowiem w opozycji do praktyki budowlanej, gdzie pośpiech jest często głównym czynnikiem podejmowania decyzji. Co ciekawe, udokumentowane badania prowadzone w warunkach laboratoryjnych [14] dają wyniki różniące się (większe prędkości fali) od obserwacji polowych. Proste przeniesienie zatem wyników laboratoryjnych na badania polowe może być źródłem niedokładności i pomyłek.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania firmie KELLER Polska za udostępnienie placu budowy i przygotowanie głowic pali do badań PIT.

LITERATURA

- [1] ASTM D5882-07 Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations
- [2] *Brzozowski T., Blockus M.*: Badania dynamiczne pali. Seminarium: Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych. Gdańsk, 25.06.2004
- [3] *Cieślak W., Gwizdała K.*: Dynamiczne badania jakości wykonywania fundamentów palowych: charakterystyka i badania modelowe. XXIII K.N.-T. Awarie budowlane: zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje. Wyd. Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2007
- [4] *Gwizdała K.*: Kontrola nośności i jakości pali fundamentowych. *Geoinżynieria i Tunelowanie*, tom 1, nr 1, 2004
- [5] *Gwizdała K.*: Projektowanie pali fundamentowych. XX Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła–Ustroń 01–04 marca 2005
- [6] *Modl A., Rybak J.*: Badania ciągłości pali prefabrykowanych. *Górnictwo i Geoinżynieria*. R. 33, z. 1, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, AGH, Kraków, 2009, s. 443–451
- [7] *Niederleithinger E., Taffe A.*: Early Stage Elastic Wave Velocity of Concrete Piles. *Cement & Concrete Composites* vol. 28, 2006, pp. 317–320
- [8] PIT COLLECTOR. User's Manual. October 2005. Pile Dynamics, Inc
- [9] PIT-W Manual. Software for PDI's Pile Integrity Tester. Version 2003. Pile Dynamics, Inc
- [10] *Rippel R.*: Próbné obciążenia i badania głębokich fundamentów. *Geoinżynieria i Tunelowanie*, tom 1, nr 2, 2004
- [11] *Rybak J., Sadowski L., Schabowicz K.*: Non-destructive impulse Response S'Mash Method for concrete pile testing. *e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*, 2008: <http://www.ndt.net/article/defektoskopie2008/papers/195.pdf>
- [12] *Rybak J., Schabowicz K.*: Acoustic wave velocity tests in newly constructed concrete piles. NDE for Safety, November 10-12, 2010, Pilsen, Czech Republic, ed. by Pavel Mazal and Luboš Pazdera. University of Technology. Faculty of Mechanical Engineering, Brno, 2010
- [13] *Rybak J.*: Prędkości fali akustycznej w młodym betonie pali fundamentowych. *Geoinżynieria, Drogi, Mosty, Tunele*. 2010, nr 6, s. 36–18
- [14] *Schabowicz K.*: Empirical relations for nondestructively determined strength of concrete on different days of its maturing. NDE for Safety, November 10–12, 2010, Pilsen, Czech Republic, ed. by Pavel Mazal and Luboš Pazdera. University of Technology. Faculty of Mechanical Engineering, Brno, 2010