

Wykorzystanie pomiaru pionowego rozkładu siły w palu do interpretacji testów statycznych

Przeprowadzanie próbnych obciążeń pali metodą statyczną z użyciem aparatury umożliwiającej pomiar dystrybucji siły wzdłuż ich trzonów jest od lat standardem w wielu krajach świata (1, 2, 4). Pomiar ten umożliwia określenie wartości siły przekazywanej na grunt przez pobocznice i podstawę pala. W ostatnim czasie również w Polsce zaczęto stosować w próbnych obciążeniach pali system pomiarowy składający się z zestawu czujników wykorzystujących technikę strunową (5, 6). Oprócz niezawodności i odporności na warunki atmosferyczne zaletami systemu są także szybkość jego instalacji, możliwość wielokrotnego zastosowania i niepowodowanie istotnych komplikacji w przebiegu próbnego obciążenia pala. Pierwsze przykłady wykorzystania systemu pomiarowego na polskich budowach, opisane w niniejszym artykule, przyniosły bardzo korzystne rezultaty i wskazują na celowość jego rozpowszechnienia w polskiej praktyce inżynierskiej.

Celowość pomiaru dystrybucji siły w badaniach pali

Pomiar rozkładu odkształceń (zmian długości) wzdłuż trzonu pala w czasie próbnego obciążenia ma wiele zalet i niesie za sobą dużo korzyści praktycznych. Informacja o rozkładzie siły wzdłuż trzonu pala podczas badania statycznego jego nośności jest przydatna między innymi w następujących sytuacjach:

- 1) W przypadku testowania nowego typu pali lub nowej technologii ich wykonywania, w celu rozpoznania charakterystyki pracy pali w gruncie – mobilizacji oporów gruntu na pobocznicy i pod podstawą w kolejnych stopniach obciążenia, aż do osiągnięcia wartości granicznych tych oporów.
- 2) W przypadku testowania i weryfikacji nowej metody obliczania nośności pali. Większość metod obliczeniowych polega na oddzielnym wyznaczeniu nośności podstawy i pobocznicy pali zgodnie z określonymi założeniami, a następnie sumowaniu tych wartości. Rozwijane są również inne, bardziej nowoczesne metody prognozowania nośności pali w gruncie, takie jak metoda funkcji transformacyjnych (3) czy MES. Pomiar podczas obciążeń próbnych reakcji podstawy i pobocznicy w palach rzeczywistych, a także mobilizacji oporów gruntu w poszczególnych warstwach podłoża pozwala na weryfikację przyjmowanych założeń obliczeniowych.
- 3) W przypadku niekorzystnych wyników próbnego obciążenia, objawiających się małą nośnością pali lub dużymi osiadaniami. Pomiar rozkładu siły wzdłuż pala pozwala wówczas na stwierdzenie, czy przyczyną takiego wyniku jest mała nośność pobocznicy, czy podstawy pala. Tego typu diagnoza byłaby np. bardzo pomocna w określeniu przyczyn często spotykanej niskiej nośności pali wierconych wielkośrednicowych, wykonywanych w niektórych rodzajach ilów lub w piaskach drobnych i pylastych nawodnionych.

4) W przypadku potrzeby dokładniejszego zmierzenia wartości tarcia mobilizowanego w górnych, słabych warstwach podłoża gruntowego, w celu określenia w dalszym etapie wartości tarcia negatywnego w palach.

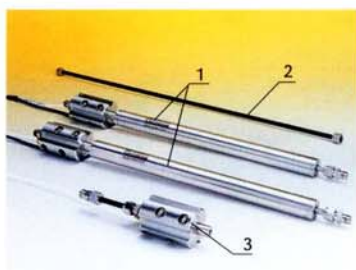
5) W przypadku badań skuteczności iniekcji pod podstawami pali. W takiej sytuacji możemy zaplanować próbne obciążenia dwóch pali: jednego z wykonaną iniekcją, drugiego bez iniekcji. Pomiar rozkładu siły na pobocznicy i podstawę pozwoliłyby na ilościową ocenę wpływu iniekcyjnego sprzężenia podstaw pali. Zebranie większej liczby danych z podobnie zaprogramowanych badań umożliwiłoby opracowanie dokładniejszych wytycznych projektowania pali z iniekcją podstaw.

Wymienione wyżej przypadki celowości zastosowań pomiarów pionowego rozkładu siły w czasie próbnego obciążenia pali są przykładowe i z pewnością nie obejmują wszystkich możliwości.

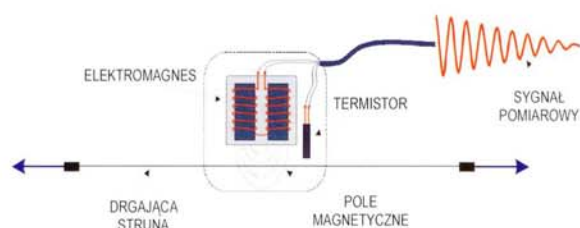
Konstrukcja i zasada działania systemu pomiarowego

Konstrukcja

Pomiar dystrybucji siły przykładanej podczas obciążenia próbnego do głowicy pala wzdłuż długości jego trzonu prowadzony jest metodą pośrednią za pomocą tzw. czujników ekstensometrycznych (7). Czujniki te umożliwiają wyznaczenie zmian długości określonych odcinków pala. W tym celu wewnątrz pala (najczęściej w jego osi), wzdłuż jego wysokości, instalowana jest wraz z koszem zbrojeniowym rurka stalowa lub rurka z tworzywa sztucznego. Przed rozpoczęciem obciążenia próbnego wprowadza się do rurki zestaw czujników ekstensometrycznych 1 (rys. 1) połączonych ze sobą prętami z włókien węglowych, szklanych 2 (rys. 1) bądź stali nierdzewnej. Najniższym położonym elementem systemu pomiarowego jest kotwa 3 (rys. 1).



Rys. 1. Składniki zestawu ekstensometrycznego (wg 7)



Rys. 2. Zasada działania czujnika strunowego

Długość całego zestawu powinna być zbliżona do długości pała, ale możliwe jest również wykonanie pomiaru tylko na interesującym nas odcinku. Do wszystkich czujników doprowadzony jest kabel elektryczny oraz przewód ciśnieniowy. Kotwa wyposażona jest jedynie w rurkę służącą do doprowadzenia ciśnienia. Gdy kotwa osiągnie projektowane położenie, przy pomocy sprężonego gazu wysuwa się specjalne, stożkowe bolce blokujące jej położenie. Podobnie postępuje się ze wszystkimi czujnikami ekstensometrycznymi, wywołując przed ich zablokowaniem lekkie napięcie w prętach łączących poszczególne czujniki. Po ustaleniu położenia zestawu ekstensometrycznego przeprowadza się w pału pomiar zerowy, podczas którego rejestrowane są początkowa częstotliwość drgań struny każdego czujnika oraz jego temperatura.

Opisywany zestaw ekstensometryczny dokonuje pomiarów zmian długości poszczególnych odcinków pała, wykorzystując tzw. tensometrię strunową. Na rys. 2 pokazano schematycznie sposób działania czujnika strunowego. Czujnik ekstensometryczny wyposażony jest dodatkowo w sprężynę o znanej charakterystyce, dzięki czemu możliwe jest wykonywanie pomiarów w zakresie kilkudziesięciu milimetrów. Cewka elektromagnetyczna wzbudza strunę do drgań oraz dokonuje odczytów częstotliwości tych drgań. Specjalne oprogramowanie umożliwia, przy zastosowaniu filtrów, określenie podstawowej częstotliwości drgań, która jest podstawą do obliczenia zmian odkształceń elementu pomiarowego. Każdy czujnik wyposażony jest ponadto w termistor, który umożliwia rejestrację temperatury w bezpośrednim sąsiedztwie struny czujnika. Pomiar temperatury jest potrzebny do tzw. kompensacji temperaturowej pomiarów.

Przebieg pomiarów i interpretacja wyników

Po wykonaniu odczytu zerowego przystępuje się do realizacji obciążenia próbnego pała zgodnie ze standardową procedu-

Summary

The static load tests are still the fundamental method used to verify project and pile construction. Information about the value of force and vertical displacements of pile head is sufficient from the engineering point of view and in situations when the load tests give positive results. However, in many other cases much more information and data is required. The information on the force distribution along the pile core and its division into friction along the shaft and resistance under the pile base is especially useful.

rą. Odczyty wskazań poszczególnych czujników prowadzi się przy zastosowaniu elektronicznego rejestratora. Wzrost obciążenia powoduje odpowiedź pała w postaci zmiany jego długości. Ponieważ pał współpracuje z gruntem wzdłuż pobocznic, zmiany długości zależą od położenia odcinka pomiarowego. Odległości pomiędzy punktami pomiarowymi mogą wynosić od 50 cm do kilku bądź kilkunastu metrów, przy czym długości odcinków powinno dobierać się każdorazowo w zależności od układu warstw geotechnicznych oraz oczekiwanej dokładności uzyskiwanych wyników. Urządzenie umożliwia podział pała na kilka do kilkunastu odcinków pomiarowych. Znając pole powierzchni przekroju betonowego pała A_c oraz pole powierzchni stali zbrojeniowej A_s , możemy wyznaczyć tzw. pole sprowadzone A_{σ} :

$$A_{\sigma} = A_c + A_s (\alpha_s - 1) \quad [1]$$

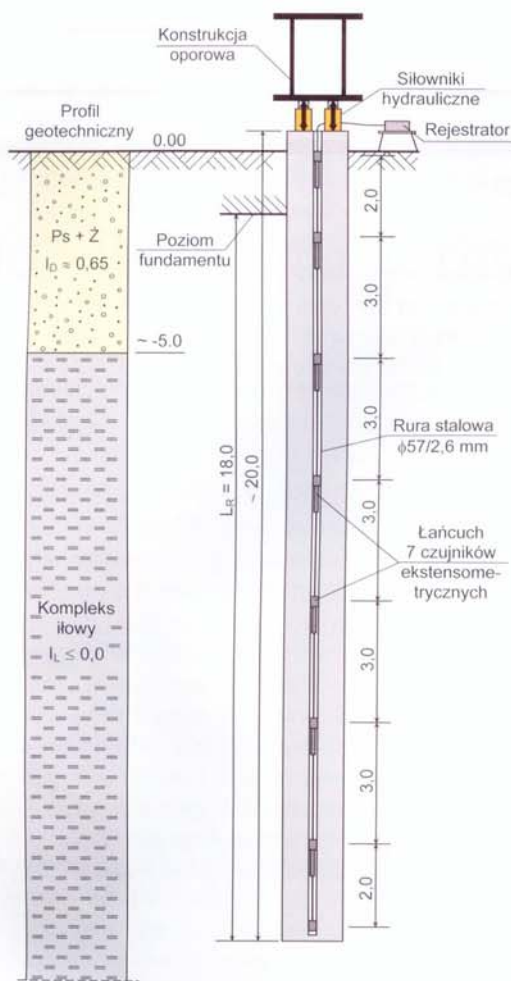
gdzie α_s jest ilorazem modułu sprężystości stali zbrojeniowej i betonu. W wartości A_{σ} powinien być uwzględniony również przekrój rurki pomiarowej, gdy jest wykonana ze stali. Jeżeli nie wykonujemy równocześnie badań modułu sprężystości betonu w pału, przyjmujemy wartość modułu odpowiednią dla danej klasy betonu E_{cm} lub wyznaczamy go na podstawie zmiany długości pierwszego odcinka pomiarowego. Znając długości odcinków pomiarowych L_i , możemy obliczyć uśrednioną wartość siły ściskającej F_i w każdym z nich:

$$F_i = \frac{\Delta L_i}{L_i} \cdot A_{\sigma} \cdot E_{cm} \quad [2]$$

gdzie ΔL_i jest skróceniem danego odcinka pomiarowego.

Ponieważ na wysokości pała temperatura podczas badania może ulegać zmianie, konieczne jest uwzględnienie korekty temperaturowej w obliczeniach zmian długości zestawu ekstensometrycznego.

Siła w pierwszym od góry odcinku pomiarowym powinna być praktycznie równa sile przykładanej do głowicy pała, dlatego też odcinek ten powinien być stosunkowo krótki i powinien być zlokalizowany poza strefą wpływu nośności pobocznic. W tym celu wskazane jest odsłonięcie pała na tym odcinku przez usunięcie gruntu.



Rys. 3. Schemat pila do próbnego obciążenia z układem czujników ekstensometrycznych



Fot. 1. Fotografie z próbnego obciążenia pila fundamentu mostu MA21 we Wrocławiu

- Zmniejszanie się siły ściskającej w kolejnych odcinkach pomiarowych świadczy o przekazywaniu obciążenia z pila przez tarcie pobocznic na grunt. Wartość i rozkład tego tarcia można następnie oszacować za pomocą odpowiedniej interpolacji.

Przykłady zastosowań systemu w praktyce

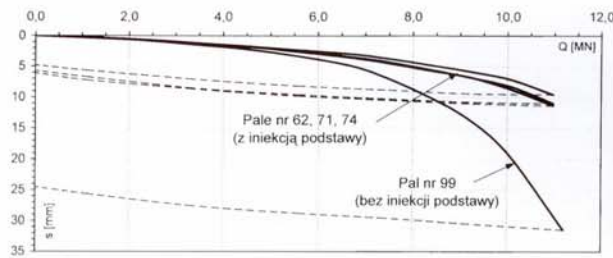
Badania pali pod fundament pylonu mostu przez Odrę we Wrocławiu

Rozpatrywany most zaprojektowano do przeprowadzenia obwodnicy autostradowej Wrocławia przez rzekę Odrę. Żelbetowy pylon mostu, zlokalizowany na wyspie, posadowiono na płycie fundamentowej opartej na 160 palach wierconych wielkośrednicowych o $\phi 1500$ mm i długości $L = 18,0$ m (8). Pale zaprojektowano z iniekcją pod podstawami, przy czym wykonawca zdecydował o zastosowaniu iniekcji bezpośrednio w grunt poprzez rury z manszetami (rozwiązanie IBDiM).

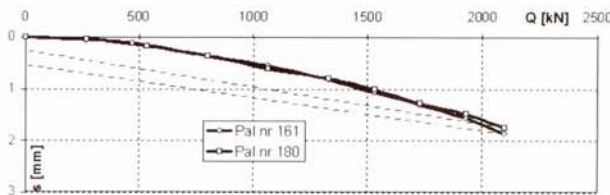
W górnych partiach podłoża gruntowego występują rzeczne utwory niespoiste, złożone z pospółek, żwirów i piasków grubych, które sięgają do głębokości około 7 m ppt. Poniżej zalega kom-

pleks plejstocęńskich ilów o znacznej miąższości, które są w stanie na pograniczu twardoplastycznego i półzwałowego. Zaprojektowane pale osadzono w kompleksie ilów.

Badania nośności pali wykonano metodą próbnych obciążeń statycznych, które przeprowadzono na 4 palach. Próbne obciążenia zrealizowano z rozszerzonym programem pomiarowym (5). Jeden pal przeznaczony do badania wykonano bez iniekcji podstawy (również bez wykonywania instalacji do tej iniekcji). Pozostałe trzy pale wykonano z iniekcją podstaw. Celem takiej decyzji było poznanie skuteczności działania iniekcji, a zarazem dodatkowa kontrola jakości jej wykonania. Ponadto w trzech palach zainstalowano system do pomiaru dystrybucji siły w trzonach, zbudowany z łańcucha 7 czujników ekstensometrycznych. Schemat przykładowego pila próbnego z układem ekstensometrów przedstawiono na rys. 3. Było to pierwsze tego typu badanie w Polsce. Zainstalowany system pomiarowy pozwolił na określenie wartości siły przenoszonej przez poszczególne odcinki pobocznic oraz przez podstawy pali, a ponadto umożliwił przybliżone ustalenie wartości siły wygenerowanej pod podstawą w wyniku iniekcji.



Rys. 4. Most MA21 we Wrocławiu – wykresy próbnych obciążeń pali (5, 7)



Rys. 6. Centrum JP II w Krakowie – wykresy próbnych obciążeń pali CFA nr 16 i 180

Próbne obciążenia pali zrealizowano według typowej procedury zalecanej przez polską normę PN-83/B-02482, z wykorzystaniem stanowiska kotwiono-balastowego (fot. 1).

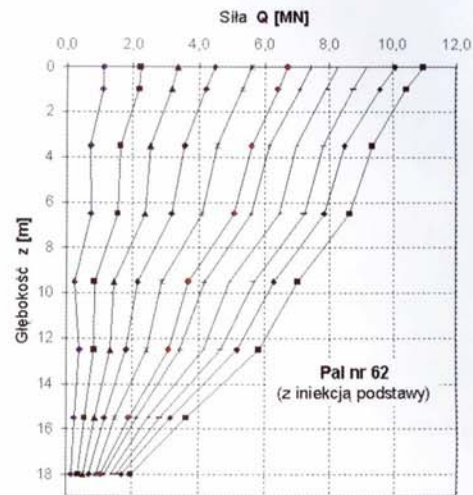
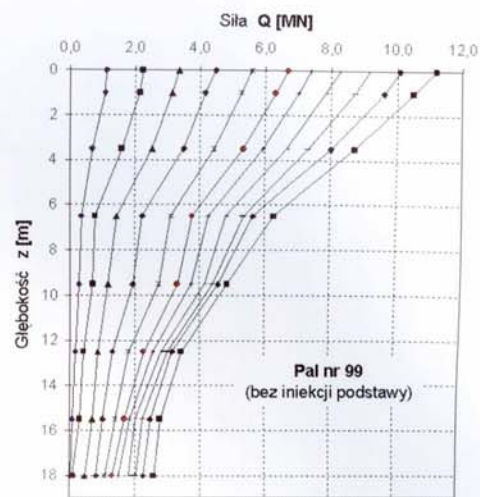
Otrzymane wyniki próbnych obciążeń pali w pełni potwierdziły słuszność decyzji o rozszerzonym programie pomiarowym. Uzyskano wiele cennych informacji, dzięki którym wyraźnie podniósł się poziom ufności co do bezpieczeństwa i charakteru pracy fundamentu w czasie przyszłej eksploatacji mostu. Na rys. 4 pokazano wykresy $Q-s$ badanych pali, na których widoczny jest korzystny wpływ iniekcji pod podstawami.

Pomiary ekstensometryczne umożliwiły ponadto oszacowanie wpływu iniekcji na pracę podstawy pala, który można określić z analizy porównawczej wykresów na rys. 5. Wpływ ten wynosi około 600 kN, co wydaje się wartością stosunkowo małą, ale należy zaznaczyć, że jest to siła, która po iniekcji na trwałe pozostała w trzonie pala, a sama iniekcja spowodowała przede wszystkim poprawę właściwości mechanicznych gruntu. Na tym samym rysunku daje się też zauważyć odmienny charakter rozdziału siły w pału bez iniekcji podstawy i w pału z iniekcją.

Badania pali CFA na budowie Centrum Jana Pawła II w Krakowie

Obiekty Centrum JP II zostały zlokalizowane na obszarze hałdy osadów wapiennych dawnego zakładu przemysłowego Solvay w Krakowie-Łagiewnikach. Proces składowania zakończono w latach 70. XX w., uzyskując poziom około 20 m nasypu. Pomimo zachodzących w czasie procesów powodujących konsolidację nasypów, większość z nich charakteryzuje się niskimi parametrami geotechnicznymi (wytrzymałość na ścinanie $S_n < 100$ kPa).

Projektant posadowienia (9), na podstawie wyników badań na dwóch poletkach próbnych, wykonanych w styczniu 2009 r., zaproponował posadowienie obiektów na palach CFA przechodzących przez osady i zagłębionych w gruntach rodzimych (w warstwach nie-spoistych o $I_D > 0,6$ i spoistych o $I_L < 0,0$). W procesie projektowania fundamentów palowych pominięto warstwy osadów, przyjmując zagłębienie pali w gruntach nośnych, rodzimych, które miały przejąć

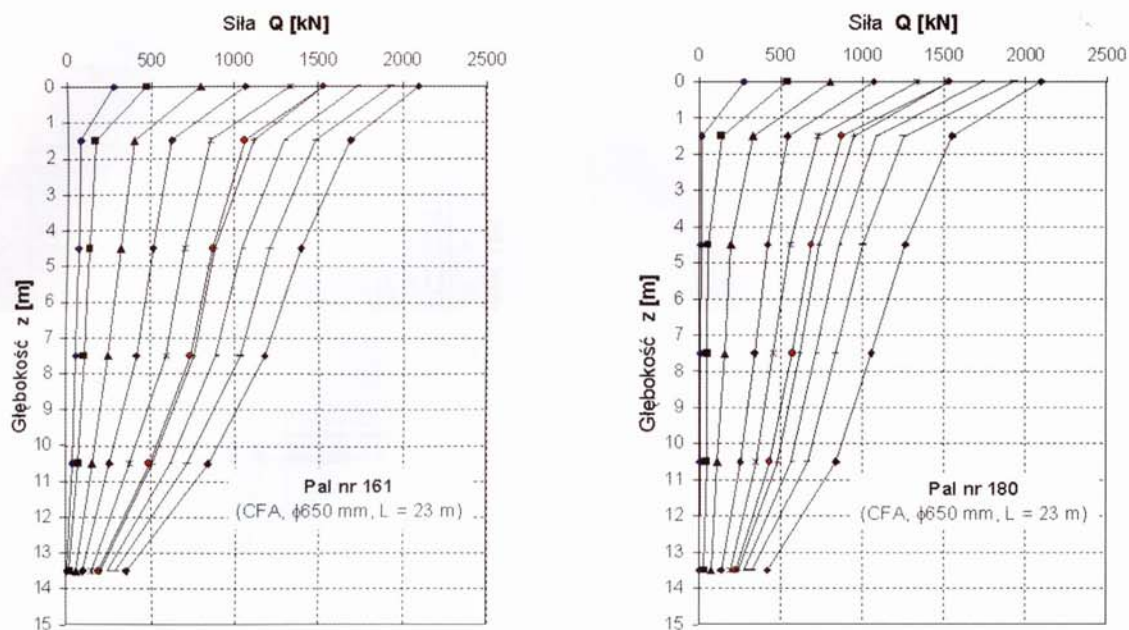


Rys. 5. Rozkłady sił w trzonach pali otrzymane z pomiarów ekstensometrycznych (5, 7)

całe obciążenia z pali. Jednakże projektant, przewidując przenoszenie tarcia z pobocznic przez warstwy osadów, zaproponował wykonanie dla dwóch pali badań sprawdzających przy zastosowaniu zestawu czujników ekstensometrycznych. Pomiary te miały na celu wyznaczenie *in situ* dystrybucji siły osiowej wzdłuż pali.

Pomiarami objęto dwa pale CFA nr 161 i 180 o średnicy 650 mm, wykonane z betonu C30/37, wzmocnione zbrojeniem sztywne z kształtowników HEB160 (6). Zbrojenie zagłębiono na 16 m, podczas gdy długość pali wynosiła 23 m. Ze względu na trudność doprowadzenia rurki pomiarowej do podstawy pala przyjęto, że pomiar będzie się odbywać na długości zbrojenia sztywnego. Tę część pala podzielono na 5 odcinków pomiarowych o długości 3,0 m. Ostatecznie cały system ekstensometryczny miał długość 15,0 m od poziomu głowicy pala. Na rys. 6 pokazano wykresy $Q-s$ badanych pali, a na rys. 7 (str. 28) – rozkłady sił w trzonach pali w kolejnych stopniach obciążenia przykładanego do ich głowic.

Przeprowadzone badania ekstensometryczne skrócenia pali CFA nr 161 i 180 wykazały między innymi, że siła przykładana do pali przenoszona była w większości przez ich pobocznicę ze stosunkowo niewielkim udziałem podstaw oraz że prawie całe wartości



Rys. 7. Rozkłady sił w trzonach pali CFA nr 161 i 180 otrzymane z pomiarów ekstensometrycznych

► osiadań pali wynikają ze skrócenia własnego ich trzonów. Przeprowadzone pomiary trwały zbyt krótko, by móc na ich podstawie prognozować zachowanie się pali w długim okresie czasu. Niemniej jednak należy stwierdzić, że osady wapienne są w stanie przenosić znaczne obciążenia z pobocznic pali CFA.

Podsumowanie

Przedstawione w artykule zalety stosowania, opis działania oraz przykłady wykorzystania systemu pomiarowego złożonego z układu ekstensometrycznych czujników strunowych powinny zachęcić zarówno projektantów, jak i wykonawców pali do częstego stosowania go w próbnym obciążeniu pali. Pomiary rozdziału siły pomiędzy pobocznice i podstawę pała przyczynią się nie tylko do podniesienia jakości próbnym obciążen, ale również do pogłębienia wiedzy inżynierskiej na temat charakteru pracy pali różnych technologii wykonywanych w odmiennych warunkach gruntowych.

Należy jednak zaznaczyć, że sposób interpretacji wyników pomiarów jest ściśle powiązany z modułem sprężystości betonu, którego wartość może się zmieniać z wysokością pała oraz z wiekiem betonu. Dodatkowo wyniki pomiarów uzależnione są od przekroju poprzecznego pała, który może się również zmieniać wzdłuż długości trzonu, w zależności od technologii wykonawstwa pali, sztywności otaczającego gruntu i ciśnienia hydrostatycznego mieszanki betonowej. Z niektórymi powyższymi problemami można sobie poradzić przez odpowiednie zaprogramowanie oraz interpretację badań (10).

Badania z wykorzystaniem omawianego urządzenia pomiarowego są realizowane i rozpowszechniane między innymi przez Politechnikę Gdańską oraz Politechnikę Krakowską. W Politechnice Gdańskiej, w Katedrze Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego system pomiarowy jest wykorzystywany między innymi w realizowanym aktualnie programie badawczym, finansowa-

nym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, pt. *Nośność i praca w gruncie pali wkręcanych* – projekt badawczy N N506 432936 – kierownik projektu Adam Krasieński. □

Piśmiennictwo

1. Bustamante M., Doix B.: *A new model of LPC removable extensometers*. Proc. 4th Int. Conf. on Piling and Deep Foundations, STRESA, Italy, April 7-12, 1991.
2. Hanifah A.A., Lee Sieng K.: *Application of global strain extensometer (Glostretx) method for instrumented bored piles in Malaysia*. Piling and Deep Foundations: 10th International Conference, Amsterdam, 31st May - 2nd June 2006. Amsterdam: DFI; EFFC, 2006.
3. Gwizdała K.: *Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej Nr 532, Budownictwo Wodne XLI, Gdańsk 1996.
4. Sellers J.B.: *Pile load test instrumentation*. Instrumentation in Geotechnical Engineering. Proc. of Geotechnical Division of the Hong Kong Institute of Civil Engineers, 1995.
5. Dembicki E., Krasieński A., Cudny M., Sieńko R.: *Badania nośności pali wierconych 1500 mm pod fundamentem pylonu mostu MA-21 przez Odrę we Wrocławiu*. Opinia naukowo-techniczna. Geosyntex Sp. z o.o., Gdynia, kwiecień 2009.
6. Sieńko R., Bednarski Ł.: *Badania ekstensometryczne pali CFA wchodzących w skład I etapu budowy Centrum Jana Pawła II w Krakowie*. Opracowanie wewnętrzne. NeoStrain Sp. z o.o., Kraków, sierpień 2009.
7. *Model 1300 (Model A9) Retrievable Extensometer*. Instruction Manual. Geokon, Inc., 2009, www.geokon.com.
8. Cudny M., Krasieński A., Dembicki E., Załęski K.: *Fundament pylonu mostu podwieszonoego w ciągu autostradowej obwodnicy Wrocławia (A8)*. Materiały Seminarium „Wrocławskie Dni Mostowe”, Wrocław, listopad 2009, oraz „Mosty” 2/2010.
9. *Projekt budowlany pali CFA wchodzących w skład I etapu budowy Centrum Jana Pawła II w Krakowie*. Projektant: B. Wrana, Kraków, maj 2009.
10. Hayes J., Simmonds T.: *Interpreting strain measurements from load tests in bored piles*. www.loadtest.com.