

Ocena działania iniekcji pod podstawą pała wierconego za pomocą badania statycznego nośności z pomiarem rozkładu siły w trzonie pała

Dr hab. inż. Adam Krasieński

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Od około dwudziestu lat stosuje się w Polsce techniki zwiększenia nośności i sztywności pali wierconych metodą iniekcji cementowej pod ich podstawami. Znane i wykorzystywane są cztery rozwiązania technologiczne, które opisano między innymi w pracach [3 ÷ 5, 13, 14]. Podczas wykonywania iniekcji ciśnieniowej są rejestrowane takie parametry jak: ciśnienie i objętość wtłoczonego zaczynu lub zaprawy cementowej, czas iniekcji, w tym czas utrzymywania maksymalnego ciśnienia oraz wartość przemieszczenia pała w kierunku do góry. Wartości tych parametrów w połączeniu z wynikami próbnych obciążeń statycznych stanowią podstawę oceny nośności pali. Do oceny skuteczności działania iniekcji bardziej miarodajne byłoby przeprowadzenie na budowie porównawczych badań nośności pali z wykonaną iniekcją i bez iniekcji podstawy. Jeszcze większą miarodajność uzyska się, gdy próbne obciążenia przeprowadzi się z pomiarem udziału pobocznic i podstawy pała w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych.

W artykule przeanalizowano istotę działania iniekcji pod podstawą pała oraz przedstawiono przykład przeprowadzenia próbnych obciążeń pali według zaproponowanej procedury. Przykład dotyczy badań pali wierconych wielkośrednicowych wykonanych pod posadowienie podpory głównej mostu przez Odrę we Wrocławiu. Przedstawiono i przeanalizowano wyniki badań nośności dwóch pali – jednego bez iniekcji i drugiego z iniekcją podstawy. Pomiary rozkładu siły osiowej w trzonach pali, zrealizowane techniką ekstensometrii strunowej, dostarczyły wiele cennych informacji na temat współpracy obu pali z podłożem gruntowym i wpływu iniekcji na tę współpracę.

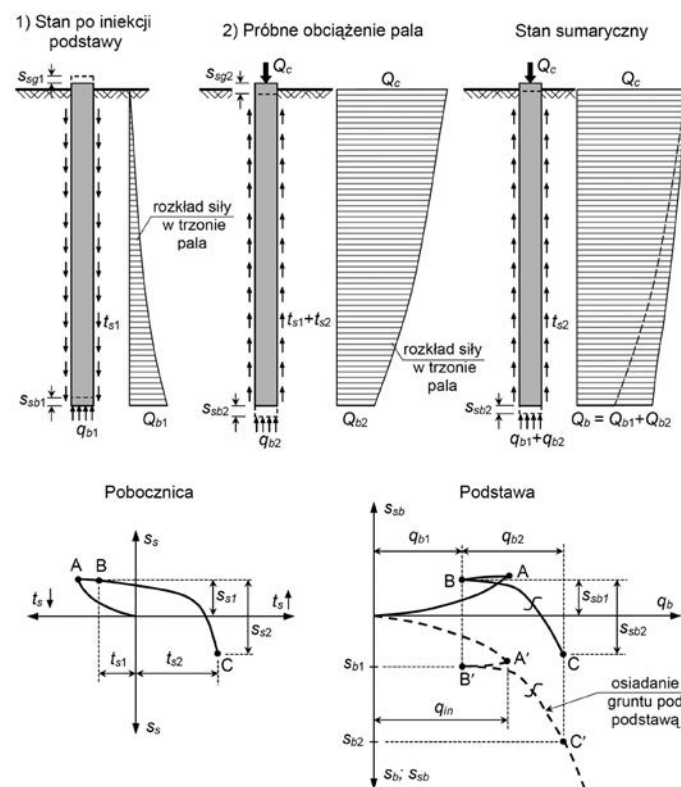
ZASADA DZIAŁANIA INIEKCJI POD PODSTAWĄ PAŁA WIERCONEGO

Zadaniem iniekcji ciśnieniowej jest wprowadzenie wstępnej siły ściskającej między podstawą pała a gruntem. Ze strony pała siła ta jest przejmowana przez tarcie gruntu wzdłuż pobocznic, które jest skierowane w dół (t_{s1} na rys. 1). W odniesieniu do gruntu zalegającego pod podstawą pała, siła iniekcji powoduje wstępne jego naprężenie i skonsolidowanie. Niwelowane jest odprężenie i naruszenie struktury gruntu powstałe podczas wiercenia otworu. W podłożu niespoistym dodatkowo dochodzi do cementacji pewnej objętości gruntu i zwiększenia efektywnej powierzchni podstawy pała. Ciśnienie iniekcji q_{in} powinno być tak dobrane, aby spowodowało przemieszczenie pała do góry s_{s1} , jednak o wartość nie przekraczającą 5 mm. Maksymalna wartość ciśnienia powinna być utrzymywana przez określony czas, a samo ciśnienie pozostawione do momentu stwardnienia zaczynu cementowego.

Wartości wstępnie wygenerowanej siły w podstawie pała nie można obliczać bezpośrednio z ciśnienia iniekcji. W wyniku różnych strat tego ciśnienia oraz na skutek konsolidacji grun-

tu pod podstawą pała trwała wartość siły w podstawie Q_{b1} jest od 30% do 50% mniejsza od wartości początkowej (obliczonej na podstawie ciśnienia iniekcji q_{in}). Na rys. 1 wartości oporów i przemieszczeń odpowiadające momentowi zadziaływania iniekcji są oznaczone na wykresach punktami A, a wartości ustabilizowane (trwale) – punktami B. Punktami A' i B' oznaczono przemieszczenia (osiadania) gruntu pod podstawą pała wywołane iniekcją ciśnieniową, które w rzeczywistości nie są możliwe do pomierzenia.

Podczas przenoszenia przez pał obciążeń zewnętrznych (np. podczas próbnego obciążenia) obserwuje się dużo mniejsze osiadania pała z iniekcją podstawy niż pała bez iniekcji. Ze schematu ideowego na rys. 1 wynika, że zmniejszenie wartości osiadania pała jest przede wszystkim efektem specyficznej pracy jego pobocznic. Podczas obciążania pała najpierw następuje redukcja do zera tarcia na pobocznic t_{s1} wzbudzonego przez iniekcję podstawy (skierowanego do dołu), a następnie odwrócenie kierunku tarcia do góry i ponowna, a właściwie dalsza, jego mobilizacja do wartości t_{s2} . W rezultacie, opór pobocznic pała, dochodząc w końcowej fazie do punktu C, może ulec nawet podwojeniu ($t_{s1} + t_{s2}$). Biorąc dodatkowo pod uwagę, że przy ścinaniu powrotnym grunt zachowuje się dużo sztywniej niż przy ścinaniu pierwotnym, uzyskuje się w efekcie większą sztywność pała w początkowych fazach obciążenia. Opór pod-



Rys. 1. Schemat ideowy działania iniekcji ciśnieniowej pod podstawą pała

stawy pala podczas próbnego obciążenia osiąga stosunkowo małą wartość Q_{b2} i wykazuje też obniżoną sztywność, trzeba jednak zaznaczyć, że opór ten dokłada się do już istniejącej siły wygenerowanej przez iniekcję.

Panuje opinia, że iniekcja podstawy zwiększa początkową sztywność pala, natomiast nie zwiększa nośności granicznej pala R_{ult} . Jednak, przy zastosowaniu metody określania nośności projektowej pala R_d według kryterium dopuszczalnych osiadań można stwierdzić, że iniekcja z pewnością zwiększa nośność projektową pala. Nośność graniczna pala ulega natomiast zwiększeniu w sytuacji, gdy w wyniku iniekcji dochodzi do scementowania gruntu i zwiększenia efektywnej powierzchni podstawy pala.

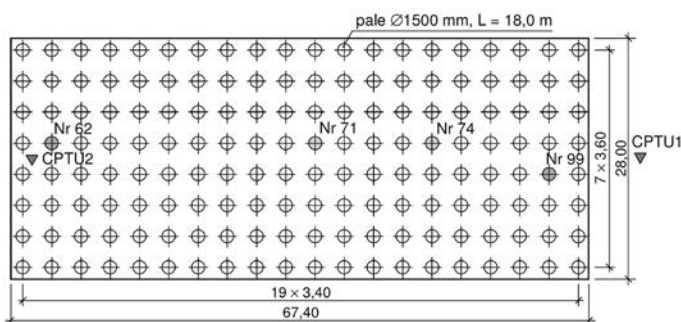
PRZYKŁAD PRAKTYCZNY BADAŃ OPRZYRZĄDOWANYCH PALI WIERCONYCH Z INIEKCJĄ PODSTAWY

Przykład dotyczy pali wierconych wielkośrednicowych wykonanych pod posadowienie podpory głównej mostu podwieszono-przez Odrę w ciągu obwodnicy autostradowej Wrocławia.

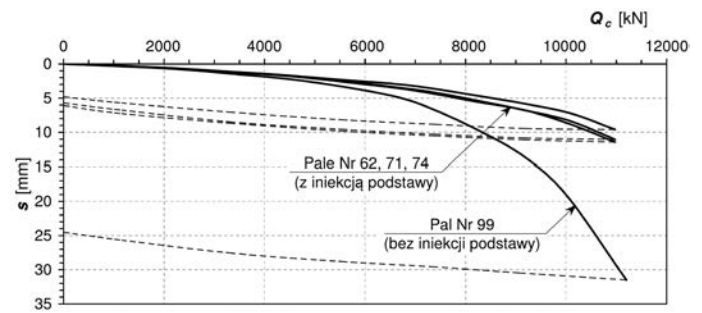
Szczegółowy opis fundamentu, warunków gruntowych, analiz obliczeniowych dotyczących posadowienia oraz podstawowe wyniki badań nośności pali zawarto między innymi w pracach [1, 6, 7]. Do posadowienia płyty fundamentowej podpory mostowej zastosowano 160 sztuk pali o średnicy $D = 1500$ mm i długości efektywnej $L = 18,0$ m (rys. 2). Pale wykonano jako wiercone w rurach osłonowych wyciąganych i z iniekcją podstaw według rozwiązania IBDiM, [14]. Spód płyty fundamentowej umieszczono na głębokości około 4,0 m p.p.t.

Pale zagłębiono w podłożu gruntowym, w którym w górnej części o miąższości 5 ÷ 7 m występują osady rzeczne w postaci średnio zagęszczonych i zagęszczonych piasków średnich i grubych, pospółek i żwirów, a poniżej zalega znacznej miąższości kompleks twaroplastycznych i półzwarłych ilów plejstoceńskich. W dalszej części artykułu zamieszczono wykresy dwóch przykładowych sondowań statycznych CPTU1 i CPTU2, których lokalizację względem planu fundamentu pokazano na rys. 2. Iły nie wykazywały właściwości pęczniących.

W ramach badań nośności pali przeprowadzono próbne obciążenia statyczne czterech pali: nr 62, 71, 74 i 99. Podstawowe wykresy osiadań pali otrzymane z badań przedstawiono na rys. 3. W artykule skupiono się na wynikach próbnego obciążenia dwóch pali: nr 62, wykonanego z iniekcją podstawy i nr 99, wykonanego bez iniekcji podstawy. Badania obu pali przepro-



Rys. 2. Plan fundamentu palowego podpory głównej mostu przez Odrę we Wrocławiu



Rys. 3. Wykresy osiadań badanych pali fundamentu mostu

wadzono z pomiarami rozkładu siły osiowej wzdłuż trzonów, zrealizowanymi techniką ekstensometrii strunowej. Należy zaznaczyć, że były to pierwsze tego rodzaju badania statyczne pali w Polsce. Zasada działania użytego systemu pomiarowego jest obecnie powszechnie znana. Opisano ją szczegółowo między innymi w kilku publikacjach [6, 7] oraz wielokrotnie wykorzystano w późniejszych pracach badawczych autora [8 ÷ 12].

Na rys. 3 można zauważyć bardzo wyraźny i pozytywny efekt zadziałania iniekcji pod podstawami pali. Po przekroczeniu wartości siły $Q \approx 4000$ kN następuje dużo większe przyrastanie osiadań w palu bez iniekcji niż w palach z iniekcją. Przy sile $Q_{max} \approx 11000$ kN pal bez iniekcji wykazał około trzy razy większe osiadania ($s \approx 31,5$ mm) niż pale z iniekcją ($s = 10 \div 12$ mm). Należy ponadto dodać, że również okresy stabilizacji osiadań w poszczególnych stopniach obciążenia były krótsze w badaniach pali z iniekcją niż pala bez iniekcji podstawy.

WYNIKI POMIARÓW I ICH ANALIZA

Zastosowana technika pomiarowa z użyciem ekstensometrii strunowej umożliwiła pomiarzenie w kolejnych stopniach obciążenia odkształceń trzonów pali w poszczególnych odcinkach. W rozpatrywanych palach takich odcinków pomiarowych było siedem (rys. 4 i 5). Na podstawie odkształceń obliczono wartości sił osiowych Q_s , które umiejscowiono w połowie wysokości każdego odcinka. Obliczone siły były wartościami średnimi na długości poszczególnych odcinków. Do obliczenia sił było potrzebne przyjęcie odpowiedniej sztywności podłużnej trzonów pali EA . Wartość tej sztywności może się jednak zmieniać z odkształceniami i z głębokością (np. z powodu niewielkich nawet zmian średnicy pala). Przyjęcie stałej wartości modułu sztywności betonu E i określonej na podstawie ogólnych zaleceń, np. z tabel na podstawie klasy betonu, jest mało dokładne i prowadzi do błędnych wyników interpretacji pomiarów. W rozpatrywanej analizie wartości EA określono bezpośrednio z pomiarów ekstensometrycznych autorską metodą iteracyjną, dotąd jeszcze nie publikowaną.

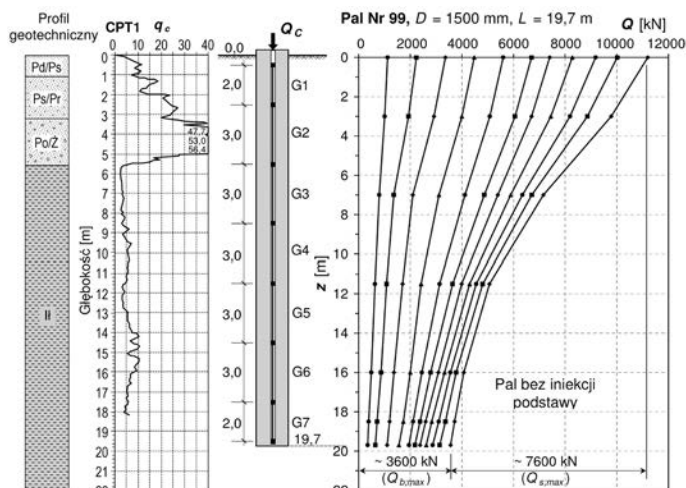
Inny, istotny problem związany z interpretacją pomiarów ekstensometrycznych dotyczy występowania wstępnej siły osiowej w trzonie pala. Określenie wartości tej siły jest trudne. Czujniki pomiarowe są instalowane w palu tuż przed próbnym obciążeniem i pozwalają zarejestrować jedynie odkształcenia, a w konsekwencji siły w trzonie pala, pojawiające się w trakcie próbnego obciążenia. Pewne propozycje dotyczące określania wartości wstępnej siły w palu autor przedstawił w publikacji [11]. Problem początkowej siły jest szczególnie istotny przy badaniach pali wbijanych i pali wierconych z iniekcją pod podsta-

wą. Jak zaznaczono wcześniej, głównym zadaniem iniekcji jest wprowadzenie takiej siły do trzonu pala. Opisane wyżej problemy, jak i inne, znane są od początku wykonywania w świecie badań pali z oprzyrządowaniem pomiarowym i scharakteryzowano je, między innymi, w pracy [2].

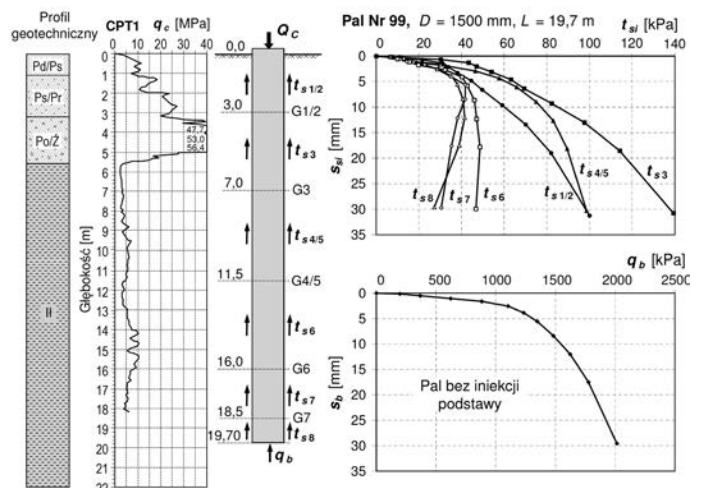
Otrzymane z pomiarów i interpretacji rozkłady sił osiowych Q_i w trzonach pali nr 99 i 62 przedstawiono na rys. 4 i 5.

Należy zaznaczyć, że pokazane na rys. 4 i 5 rozkłady sił osiowych różnią się nieznacznie od rozkładów pochodzących z tych samych badań, przedstawionych w publikacjach [1, 6, 7]. Różnice wynikają z opisanego wyżej sposobu przyjmowania modułu sztywności betonu do interpretacji wyników pomiarów. Wykresy przedstawione w pracach [1, 6, 7] uzyskano, przyjmując stałą wartość modułu E betonu, określoną na podstawie klasy betonu.

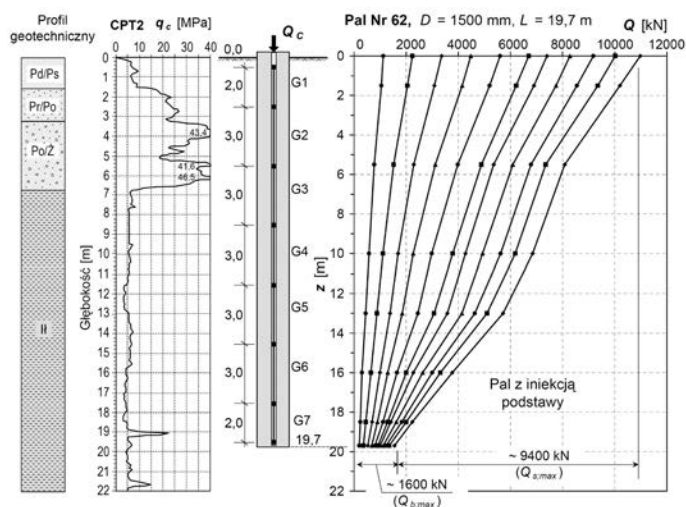
Ponadto, podczas badań obu pali wystąpiły problemy pomiarowe, które ujawniły się dopiero podczas interpretacji. Polegały one na zbyt słabym zakotwieniu niektórych czujników ekstensometrycznych i zjawiskiem „ślizgania” się kotew wewnątrz rur. Z tego powodu, przy interpretacji pomiarów z badania pala nr 99 sumarycznie potraktowano wartości pomiarowe z czujników G1 i G2 oraz G4 i G5 (rys. 4 i 6), natomiast przy interpretacji pomiarów z badania pala nr 62 sumarycznie potraktowano wartości pomiarowe z czujników G2 i G3 (zob. rys. 5 i 7).



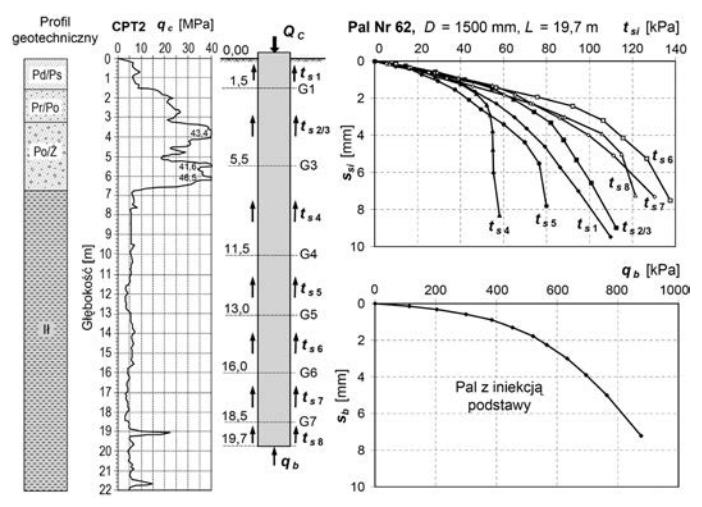
Rys. 4. Uzyskane z pomiarów rozkłady siły osiowej w trzonie pala nr 99



Rys. 6. Wykresy oporów gruntu wzdłuż pobocznic i pod podstawą pala nr 99



Rys. 5. Uzyskane z pomiarów rozkłady siły osiowej w trzonie pala nr 62

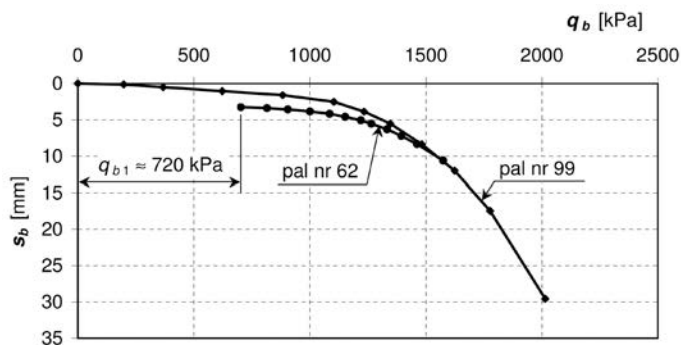


Rys. 7. Wykresy oporów gruntu wzdłuż pobocznic i pod podstawą pala nr 62

Już pobieżna analiza wykresów przedstawionych na rys. 4 i 5 pozwala zauważyć istotną różnicę w ich kształtach, która wynika z odmiennego rozdziału na pobocznice Q_s i podstawę Q_b obciążeń zewnętrznych przenoszonych przez oba badane pale. W palu nr 99 (bez iniekcji podstawy) część przenoszona przez podstawę w końcowej fazie próbnego obciążenia osiągnęła wartość $Q_{b,max} \approx 3600$ kN, a w palu nr 62 (z iniekcją podstawy) wartość ponad dwukrotnie mniejszą, wynoszącą $Q_{b,max} \approx 1600$ kN. Odwrotna relacja występuje oczywiście w obciążeniach przenoszonych przez opory pobocznic Q_s . Można zatem uznać, że potwierdził się dokładnie schemat działania iniekcji pod podstawą pala, przedstawiony ideowo na rys. 1.

Na rys. 6 i 7 przedstawiono rezultaty dalszych interpretacji wyników badań i pomiarów w postaci wykresów mobilizacji oporów jednostkowych gruntu w funkcji przemieszczeń pali: oporów t_s wzdłuż pobocznic i oporów q_b – pod podstawami pali. Wartości t_{si} należy rozumieć jako uśrednione z długości poszczególnych odcinków pomiarowych, które jednak nie zawsze pokrywają się z układem warstw gruntowych w podłożu.

Z przedstawionych wyników szczególnie interesujące są wartości oporów jednostkowych $t_{s,6}$, $t_{s,7}$ i $t_{s,8}$ zarejestrowanych w dolnych odcinkach pali w warstwie ilów. W badaniu pala nr 99 (rys. 6) opory te osiągają wartości maksymalne rzędu



Rys. 8. Szacunkowe określenie wartości wstępnego naprężenia gruntu pod podstawą pala q_{b1} wygenerowanego iniekcją ciśnieniową

40 kPa, przy przemieszczeniach rzędu $5 \div 10$ mm i przy dalszych przemieszczeniach ulegają redukcji, co jest typowe w takim rodzaju gruntu. Natomiast w badaniu pala nr 62 (rys. 7) te same opory t_{s6} , t_{s7} i t_{s8} w warstwie ilów zarejestrowano o wartościach około trzy razy większych, rzędu $120 \div 140$ kPa, i które przy przemieszczeniach około 8 mm nie osiągnęły jeszcze pełnej mobilizacji. Można zatem stwierdzić, że w wyniku iniekcji pod podstawą opory tarcia t_s ilu w dolnych odcinkach pali uległy więcej niż podwojeniu. Wzrost taki może dodatkowo wynikać z różnic w parametrach mechanicznych gruntów wokół obu pali, jak również z efektu wzmocnienia gruntu w dolnej strefie pala spowodowanego iniekcją pod podstawą.

Na rys. 8 zestawiono razem wykresy oporów q_b z badań obu pali, w takiej samej skali naprężeń i przemieszczeń. Zestawienia dokonano tak, żeby wykres z badania pala nr 62 w miarę gładko przechodził w wykres z badania pala nr 99. W ten sposób, z dużym przybliżeniem, oszacowano wartość naprężenia $q_{b1} \approx 720$ kPa w gruncie pod podstawą pala, jakie na trwałe została po sobie iniekcja ciśnieniowa. Według metryki, ciśnienie zaczynu cementowego podczas iniekcji wynosiło 1500 kPa. Można zatem stwierdzić, że trwały efekt działania tego ciśnienia w rozpatrywanym przypadku obniżył się mniej więcej dwukrotnie.

WNIOSKI

- 1) Opisane w artykule badania wykazały, że wykonywanie iniekcji ciśnieniowej pod podstawami pali wierconych jest bardzo zasadne i zwiększa wyraźnie sztywność, jak i nośność projektową pali. Miarodajne stwierdzenie takiego faktu wymaga wykonania na danej budowie porównawczych próbnych obciążeń pali z iniekcją i bez iniekcji podstawy.
- 2) Przytoczony w artykule przykład praktyczny wskazuje dodatkowo na to, że jest bardzo celowe wykonywanie badań pali z pomiarem rozkładu siły osiowej wzdłuż trzonów pali. Pomiar taki nie tylko pozwala dokładniej sprawdzić skuteczność iniekcji, ale również bliżej poznać istotę jej działania oraz charakterystykę współpracy pali z gruntem.
- 3) Chociaż podstawowym celem iniekcji podstawy pala jest wstępne naprężenie jej podłoża, to stwierdzono, że zabieg ten aktywuje również zwiększone opory gruntu wzdłuż poboczniczy pala. Według analiz teoretycznych

opory wzdłuż poboczniczy mogą wzrosnąć dwukrotnie, a według badań – nawet trzykrotnie, szczególnie w strefie dolnych odcinków pali.

- 4) Opisany w artykule przykład dotyczy pojedynczego przypadku badań oprzyrządowanych pali wierconych z iniekcją podstaw, i jak dotąd jedynych tego rodzaju badań w Polsce. Uzyskane z nich wyniki nie pozwalają jeszcze na formułowanie zasadniczych wniosków i proponowanie uogólnień. Autor jest jednak przekonany, że tego rodzaju badania rozpowszechnią się i po zebraniu odpowiednio bogatej bazy danych będzie możliwe dojście do określonych uogólnień i na ich podstawie opracowanie, długo oczekiwanej, miarodajnej metody projektowania pali z iniekcją ciśnieniową pod podstawami oraz metody prognozowania zachowania się tego rodzaju pali w gruncie.

LITERATURA

1. Cudny M., Krasiński A., Załęski K., Dembicki E.: Fundament pylono mostu podwieszonoego w ciągu autostradowej obwodnicy Wrocławia (A8). Mosty, nr 2/2010.
2. Fellenius B. H.: From strain measurements to load in an instrumented pile. Geotechnical News Magazine, Vol. 19, No. 1, 2001, 35-38.
3. Gwizdała K., Pinkowski A.: Wpływ iniekcji pod podstawą na osiadanie pali wierconych w piaskach. Inżynieria i Budownictwo, r. 63, nr 7-8, 2007.
4. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. PWN, Warszawa 2010.
5. Jarominiak A., Trojnar K., Folta L.: Ocena skuteczności zastosowania pali z komorami iniekcyjnymi w podporach mostu autostradowymi przez Wisłę koło Torunia. Inżynieria i Budownictwo, nr 11, 2000.
6. Krasiński A., Sieńko R.: Pomiar pionowego rozkładu siły w palu podczas testów statycznych. Materiały 56 Konferencji Naukowej KILiW PAN oraz KN PZITB „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Krynica 2010, 161-168.
7. Krasiński A., Sieńko R.: Wykorzystanie pomiaru pionowego rozkładu siły w palu do interpretacji testów statycznych. Magazyn Autostrady, nr 11/2010, 24-28.
8. Krasiński A.: Advanced field investigations of screw piles and columns. Archives of Civil Engineering, LVII, 1, 2011, 45-57.
9. Krasiński A.: Badania terenowe przemieszczeniowych pali i kolumn wkręcanych typu SDP i SDC. Kwartalnik IBDiM „Drogi i Mosty”, nr 1-2/2011, 21-58.
10. Krasiński A.: Wyniki badań terenowych pali i kolumn wkręcanych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2011, 516-530.
11. Krasiński A.: Problematyka interpretacji pomiarów rozkładu siły osiowej w trzonie pala podczas próbnych obciążeń statycznych, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2012, 118-124.
12. Krasiński A.: Pale przemieszczeniowe wkręcane. Współpraca z niesopistym podłożem gruntowym. Monografie Nr 134, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.
13. Pinkowski A., Gwizdała K.: Analiza wpływu iniekcji pod podstawami pali wierconych. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budownictwo, 2006, nr 28. XIV Krajowa Konf. Mech. Gruntów i Fundamentowania, Augustów-Białystok 2006, t. 2.
14. Szymankiewicz Cz.: Iniekcyjne naprężanie podstaw pali wierconych i baret. Seminarium Fundamenty Palowe i Specjalne. Warszawa 2004.