

Zastosowanie iniekcji cementowej pod podstawami pali wierconych posadowionych w iłach pęczniejących

■ dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała, prof. nadzw., Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej
 ■ dr inż. Tadeusz Brzozowski, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej

Posadowienie wielu obiektów budowlanych realizowane jest obecnie w bardzo trudnych warunkach gruntowych. Grunty o bardzo zróżnicowanej nośności i odkształcalności, zalegające nawet do kilkunastu metrów poniżej powierzchni terenu, nie są w stanie przenieść znacznych obciążeń od konstrukcji. W takich przypadkach powszechnie stosuje się ulepszenie podłoża gruntowego lub fundamenty palowe.

1. Wstęp

Do bardzo nietypowych i trudnych należy posadowienie pali w gruntach pęczniejących. Występują one głównie w środkowej i południowej Polsce [6]. Doświadczenia ostatnich lat podczas budowy obiektów np. w Bydgoszczy, Poznaniu, Warszawie i w okolicach Krakowa, wyraźnie wskazują na duże trudności projektowe i wykonawcze przy realizacji fundamentów palowych w gruntach ekspansywnych. Właściwości fizyczne gruntów ekspansywnych (np. iły płoceńskie, iły krakowieckie) były wielokrotnie omawiane [3, 4, 6, 11] i nie są przedmiotem tego artykułu.

W odniesieniu do technologii stosowanych w fundamentach palowych należy wymienić co najmniej pęcznienie lub skurcz w przypadku zmian wilgotności, istotne zmiany wytrzymałości na ścinanie w przypadku odprężenia. Szczególnie zjawiska występujące przy wykonawstwie pali wierconych mogą bardzo niekorzystnie wpływać na ostateczne zachowanie się pala w podłożu i na charakterystyki obciążenie – osiadanie.

Wykonawstwo pali może powodować m.in.:

- zmianę stanu i odkształcenia iłu w bezpośrednim kontakcie świeżego betonu przy podstawie pala w pierwszej fazie betonowania,
- zmiany stanu wilgotności i wytrzymałości na ścinanie wzdłuż poboczniczy pala, spowodowane wodą zarobową z betonu,
- zmiany spowodowane przemieszczaniem się wody (w górę i w dół) wzdłuż rur osłonowych w czasie drążenia otworu,
- zmiany wilgotności iłu spowodowane niewłaściwą technologią wiercenia (np. zalewanie otworu) lub niesprawnym sprzętem (np. nieszczelne zamki rur osłonowych),
- pogorszenie parametrów fizycznych i mechanicznych w rejonie podstawy, spowodowane odprężeniem podłoża, szczególnie przy powolnym wykonawstwie i złej organizacji pracy,
- niewiadome skutki wpływu temperatury i czasu wiązania betonu na parametry iłów pęczniejących,

Inne skutki i efekty zmian obserwuje się dla pali wbijanych. Zjawiska te omawiane i analizowane będą w innych pracach. W ostatecznej ocenie należy uwzględnić zmianę modułów odkształcenia wraz z głębokością z uwzględnieniem naprężenia prekonsolidacji, gdzie różnice w wartościach podawanych w „typowych” dokumentacjach geotechnicznych mogą być trzy-, a nawet pięciokrotnie!

Bardzo złożone zjawiska w mikro- i makrostrukturze, szczególnie istotne w strefie kontaktu pobocznicza pala – podłożu oraz podstawa pala – podłożu, mają decydujące znaczenie dla charakterystyki obciążenie – osiadanie. Właściwe zaprojektowanie, obliczenie nośności i osiadania oraz wykonanie pali w gruntach ekspansywnych stanowi bardzo trudne zadanie inżynierskie. Doświadczenia ostatnich lat pokazują, że stosowanie zasad zawartych w normie palowej PN-83/B-02482 nie jest odpowiednie dla gruntów pęczniejących.

Niezależnie od powyższych zagadnień należy szukać nowych rozwiązań ograniczających do minimum omawiane wpływy, by

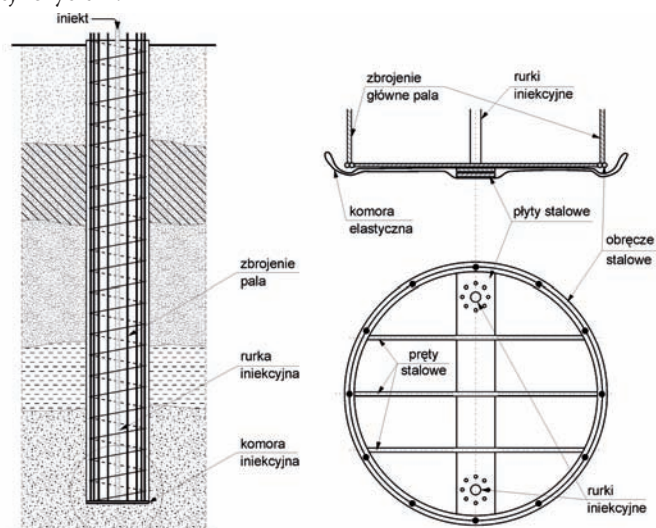
w możliwie największym zakresie wykorzystać wytrzymałość iłów jak dla stanu nienaruszonego. W artykule przedstawiono przykład zastosowania pali wierconych o średnicy 1200 mm, posadowionych w iłach pęczniejących, do posadowienia dwóch obiektów mostowych w Bydgoszczy. Podpory palowe wykonano dla mostu przez Kanał Bydgoski oraz dla mostu przez rzekę Brdę.

W celu poprawienia warunków przenoszenia obciążeń przez podłoże, zastosowano iniekcję cementową pod podstawami pali. Przedstawiono charakterystykę podłoża gruntowego (głównie w oparciu o wyniki badań sondą statyczną CPTU), parametry iniekcji w czasie realizacji podpór palowych oraz wyniki próbnych obciążeń statycznych pali.

2. Metoda iniekcji pod podstawy pali

Metoda iniekcji cementowej opracowana w Katedrze Geotechniki Politechniki Gdańskiej polega na zastosowaniu specjalnej elastycznej komory, wykonanej zazwyczaj z półprzepuszczalnej geotkaniny. Komora została opatentowana w 2005 r. jako *Sposób zwiększania nośności oraz zmniejszania osiadania wielkośrednicowych pali wierconych* (patent PL 188356). Schemat komory iniekcyjnej przedstawiono na rycinie 1, przykład realizacji komór iniekcyjnych z placu budowy obrazuje rycina 2.

Iniekcję wykonuje się po siedmiu dniach od zabetonowania trzonu pala za pomocą modyfikowanego zaczynu cementowego. Zaczyn cementowy wprowadzany jest przez dwie rurki iniekcyjne pod ciśnieniem 2–4 MPa. Komora, łącznie z dyszami iniekcyjnymi, przymocowana jest do kosza zbrojeniowego i razem z nim opuszczana do otworu przed betonowaniem pala. Rurki iniekcyjne połączone są z dyszą iniekcyjną, składającą się z dwóch płyt stalowych umieszczonych wewnątrz geosyntetycznej komory przed jej zszyciem.



Ryc. 1. Schemat komory iniekcyjnej według rozwiązania Katedry Geotechniki Politechniki Gdańskiej



Ryc. 2. Most przez rzekę Brdę w Bydgoszczy: a) zbrojenie pala \varnothing 1200 mm z komorą iniekcyjną, b) wiercenie pala w ilach pęczniących

Płaska dysza iniekcyjna zapewnia równomierne rozchodzenie się iniektu pod całą powierzchnią podstawy pala, a geosyntetyczna komora iniekcyjna nie dopuszcza do niekontrolowanych wpływów w gruntach silnie przepuszczalnych. Zależnie od potrzeb, przepuszczalność samej komory może być łatwo regulowana w zależności od lokalnych warunków geotechnicznych (np. warstwa żwirowa, ily pęczniące, spękane skały).

W celu zapewnienia właściwych efektów iniekcji zaczyn cementowy jest odpowiednio modyfikowany, dość gęsty, o stosunku $c/w = 1,25-1,50$ i dobierany zależnie od fazy iniekcji oraz warunków gruntowych. Skład zaczynu powinien być tak komponowany, aby umożliwić łatwe jego pompowanie w czasie iniekcji i wiązanie nie szybsze niż po 2–4 godzinach.

Jednym z warunków skuteczności zabiegu iniekcji jest uzyskanie odpowiedniego ciśnienia, wynoszącego 2–4 MPa. Tłoczenie odbywa się z małym wydatkiem i utrzymywaniem ciśnienia na kolejnych stopniach. W czasie całego procesu iniekcji należy kontrolować podnoszenie pali. Jest to bardzo ważny parametr, a przemieszczenie pala do góry nie powinno przekraczać 5,0 mm. W praktyce, przemieszczenia wynoszą najczęściej 0,5–2,0 mm [1, 7, 8, 9].

Wzmocnienie podłoża za pomocą elastycznej komory iniekcyjnej w sposób zdecydowany zmniejsza osiadania oraz zwiększa nośność. Badania wielu pali potwierdzają jednoznacznie skuteczność tej metody [1, 2, 5, 8].

3. Iniekcja wykonana pod most nad Kanałem Bydgoskim

Dla obu mostów pale wykonano w gruntach uwarstwionych, w ilych pęczniących. Most nad Kanałem Bydgoskim zaprojektowano jako trójprzęsłowy na palach o średnicy 1200 mm. Długość pali na przyczółkach wynosiła od 13,0 m do 15,0 m. Na podporach pośrednich pierwotnie pale zaprojektowano o długości 24,0 m.

Ścisła współpraca projektanta, wykonawcy, geologa i geotechnika ostatecznie pozwoliła na skrócenie najdłuższych pali do 18,0 m. Należy podkreślić, że dłuższe pale, wykonywane z trudnościami w czasie wiercenia i w dłuższym czasie, w ilych pęczniących mogą pracować znacznie gorzej. Sprawne wykonanie pali oraz iniekcja w specjalnie dobrane komory iniekcyjne z geosyntyków (szczelna geomembrana na górze i dole komory iniekcyjnej z częściową boczną przepuszczalnością) zapewniła bardzo dobre charakterystyki przenoszenia obciążeń.

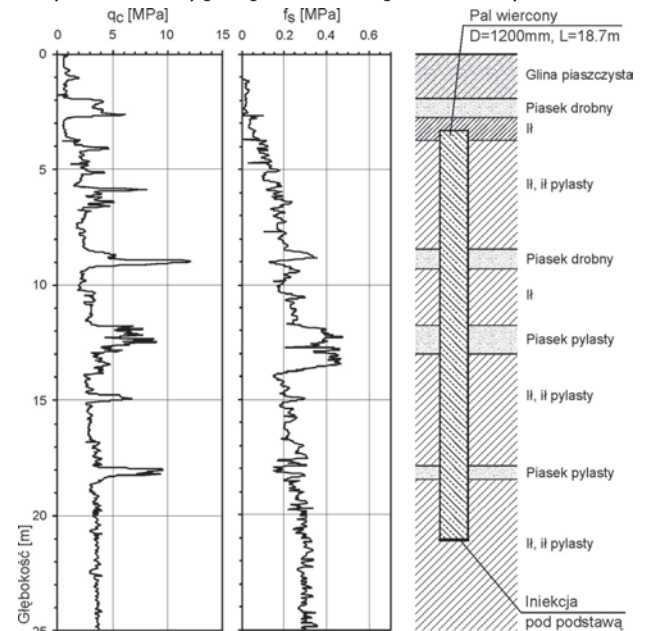
Pale wykonywano z zabezpieczeniem otworu rurą do głębokości ok. 15,0 m. Dolną część otworu wiertniczego wykonywano w naturalnym ile, bez rurowania.

W całym przekroju zalegają ily poznańskie przewarstwione piaskami drobnymi i pylastymi (ryc. 3). Na rycinie przedstawiono również wyniki sondowania sondą wciskaną CPTU. Duże tempo prac wiertniczych, betonarskich oraz konstrukcja komory iniekcyjnej przyczyniły się do minimalnych zmian w stanie naprężenia i stanie wilgotności gruntów pod podstawą pala.

Przykładowe parametry iniekcji dla podpory 2 przedstawiono w tabeli 1, a dla całego obiektu mostowego w tabeli 2. Warto zwrócić uwagę, że warunki technologiczne mogą znacząco zmieniać się pod poszczególnymi palami w ramach jednej podpory. Świadczą o tym współczynniki zmienności, $v_c = 0,21$ oraz $v_o = 0,17$, odpowiednio dla maksymalnego ciśnienia iniekcji oraz dla objętości wtłoczonego iniektu.

Proces iniekcji należy przeprowadzić w taki sposób, aby praca całej podpory była jednorodna. Likwidacja pewnych nierównomierności w pracy całej podpory palowej, jest jednym z zadań iniekcji cementowej pod podstawami pali wierconych.

Proces iniekcji należy przeprowadzić w taki sposób, aby praca całej podpory była jednorodna. Likwidacja pewnych nierównomierności w pracy całej podpory palowej, jest jednym z zadań iniekcji cementowej pod podstawami pali wierconych.



Ryc. 3. Przekrój geotechniczny i badanie CPTU

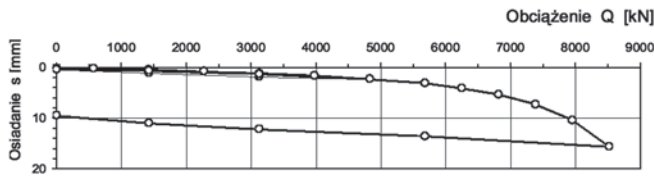
Tab. 1. Parametry iniekcji, most nad Kanałem Bydgoskim, podpora 2

| Nr pala | Łączny czas iniekcji [min] | Maksymalne ciśnienie iniekcji [MPa] | Objętość wtłoczonego iniektu [dm ³] | Uzyskane podniesienie pala [mm] |
|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| A2 | 300 | 1,1 | 260 | 0,60 |
| B2 | 95 | 1,1 | 280 | 0,50 |
| C2 | 95 | 1,4 | 260 | 0,55 |
| D2 | 280 | 1,0 | 220 | 0,40 |
| E2 | 325 | 1,1 | 270 | 0,40 |
| F2 | 120 | 1,2 | 320 | 0,60 |
| G2 | 345 | 1,2 | 350 | 0,50 |
| H2 | 305 | 1,4 | 260 | 0,55 |
| I2 | 25 | 2,0 | 170 | 0,80 |
| J2 | 310 | 1,0 | 240 | 0,70 |
| K2 | 125 | 1,1 | 280 | 0,60 |
| L2 | 25 | 1,4 | 220 | 0,40 |
| Ł2 | 415 | 1,2 | 280 | 0,55 |
| M2 | 380 | 1,2 | 280 | 0,45 |
| średnia | 225 | 1,2 | 264 | 0,54 |
| odchyl. standard. | 136 | 0,3 | 44 | 0,12 |
| wsp. zmienności | 0,61 | 0,21 | 0,17 | 0,21 |

Wyniki próbnych obciążeń pali potwierdziły bardzo dobrą pracę w podłożu (ryc. 4). Zaobserwowano bardzo małe osiadania dla całej krzywej osiadania; dla obciążenia maksymalnego $Q_{max} = 8520$ kN, osiadanie całkowite, $s_c = 15,58$ mm, a osiadanie trwałe po odciążeniu, $s_p = 9,41$ mm. Nośność na podstawie interpretacji próbnego obciążenia statycznego według PN-83/B-02482 przyjęto $N = 6820$ kN, przy odpowiadającym osiadaniu $s_c = 5,29$ mm. Obciążenie obliczeniowe dla podpory wyniosło $Q_r = 4800$ kN.

Tab. 2. Parametry iniekcji dla całego obiektu, most nad Kanałem Bydgoskim

| Parametry iniekcji | Wartość |
|-----------------------------------|-----------|
| 1) ciśnienie iniekcji: | |
| a) zakres w [MPa] | 0,9–1,2 |
| b) współczynnik zmienności | 0,09–0,27 |
| 2) objętość zaczynu cementowego: | |
| a) zakres w [dm ³] | 264–415 |
| b) współczynnik zmienności | 0,11–0,36 |
| 3) czas iniekcji [min] | 97–373 |
| 4) podniesienie głowicy pala [mm] | 0,54–2,34 |



Ryc. 4. Krzywa osiadania dla pala z iniekcją pod podstawą

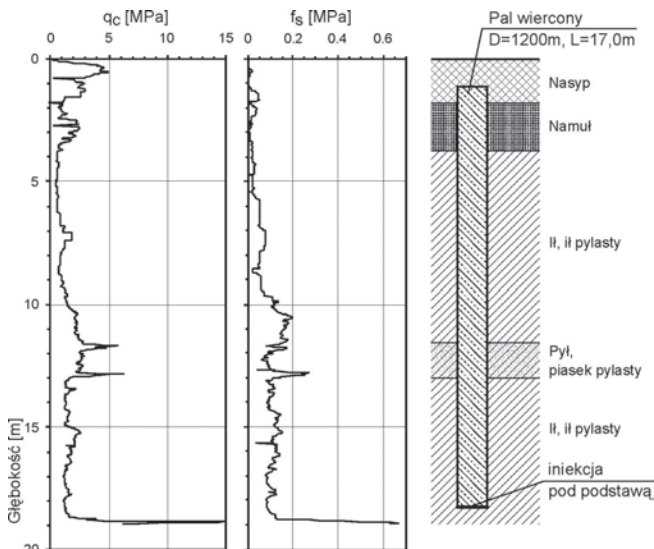
4. Iniekcja wykonana pod most przez rzekę Brdę

Trójprzęsłowy most przez Brdę posadowiono na dwóch przyczółkach i dwóch podporach pośrednich. Wszystkie podpory zaprojektowano na palach wierconych, z wyciąganą rurą obsadową o średnicy 1200 mm. Pod przyczółkami długość pali wynosiła 17,0 m, pod podporami pośrednimi 12,5 m. Pod wszystkimi palami wykonano iniekcję cementową według rozwiązania Katedry Geotechniki Politechniki Gdańskiej.

Profil geotechniczny wraz z wynikiem badań CPTU przedstawiono na rycinie 5. W górnej części przekroju znajdują się grunty nienośne, poniżej wzdłuż całej długości pala zalegają plastyczne iły. Przykładowe parametry iniekcji pod podstawą dla podpory 3 przedstawiono w tabeli 3.

Podobnie jak poprzednio, parametry iniekcji są dostosowywane do warunków występujących w rejonie podstawy każdego pala. Przyjmując w danych warunkach maksymalne ciśnienie iniekcji rzędu 0,8–1,0 MPa, otrzymano dość zróżnicowane objętości wtłoczonego iniektu. Dla omawianej podpory 3 średnia objętość iniektu wynosi 358 dm³, przy współczynniku zmienności $v_o = 0,28$. W wartościach bezwzględnych (tab. 3) są to objętości od 210 dm³ do 610 dm³. Trudne warunki posadowienia podpory potwierdzają również sondowania CPTU (ryc. 5).

Wyniki próbnego odciążenia pala o długości 17,0 m przedstawiono na rycinie 6. Obciążenie obliczeniowe jest bezpiecznie przenoszone

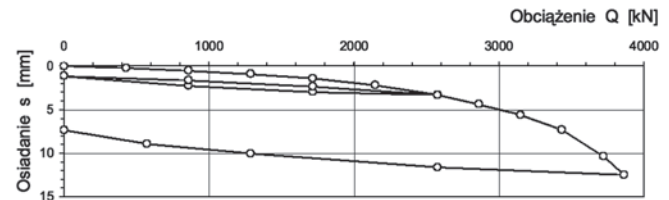


Rys. 5. Profil geotechniczny i wyniki badań sondą statyczną

przy małych osiadaniach. Odpowiednie wartości wynoszą:

- obciążenie $Q_{max} = 3860$ kN, przy osiadaniu całkowitym $s_c = 12,46$ mm oraz osiadaniu trwałym po odciążeniu $s_p = 7,34$ mm,
- obciążenie pośrednie, przy odciążeniu $Q_1 = 2580$ kN, przy $s_c = 3,28$ mm oraz $s_p = 1,12$ mm.

Przyjęto nośność z próbnych obciążeń $N = 2860$ kN, przy osiadaniu całkowitym $s_c = 4,36$ mm.



Ryc. 6. Krzywa osiadania dla pala o średnicy 1200 mm i długości L = 17,0 m

Tab. 3. Parametry iniekcji, most przez rzekę Brdę, podpora 3

| Nr pala | Łączny czas iniekcji [min] | Maksymalne ciśnienie iniekcji [MPa] | Objętość wtłoczonego iniektu [dm ³] | Uzyskane podniesienie pala [mm] |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| 1 | 230 | 0,8 | 320 | 1,00 |
| 2 | 130 | 0,7 | 610 | – |
| 3 | 50 | 0,9 | 220 | 0,60 |
| 4 | 155 | 0,8 | 310 | 1,00 |
| 5 | 425 | 0,8 | 390 | 0,60 |
| 6 | 430 | 0,8 | 330 | 0,80 |
| 7 | 415 | 0,9 | 370 | 1,05 |
| 8 | 410 | 0,7 | 570 | 1,20 |
| 9 | 45 | 1,4 | 400 | 0,60 |
| 10 | – | 0,9 | 350 | 1,00 |
| 11 | 380 | 0,8 | 330 | 1,10 |
| 12 | 45 | 1,2 | 210 | 0,80 |
| 13 | 160 | 0,8 | 320 | 1,10 |
| 14 | 420 | 0,8 | 360 | 0,75 |
| 15 | 390 | 0,8 | 350 | 0,70 |
| 16 | 235 | 0,9 | 340 | 0,90 |
| 17 | – | 1,0 | 400 | 1,20 |
| 18 | – | 0,8 | 420 | 1,10 |
| 19 | 40 | 0,8 | 220 | – |
| 20 | 430 | 0,9 | 445 | 0,85 |
| 21 | – | – | – | – |
| 22 | 425 | 0,7 | 380 | 1,40 |
| 23 | 70 | 0,8 | 240 | 0,60 |
| średnia | 257 | 0,9 | 358 | 0,92 |
| odchylenia standardowego | 163 | 0,2 | 99 | 0,23 |
| wsp. zmienności | 0,63 | 0,19 | 0,28 | 0,26 |

Zestawienie parametrów iniekcji dla mostu przez rzekę Brdę przedstawiono w tabeli 4.

Tab. 4. Parametry iniekcji dla całego obiektu, most przez rzekę Brdę

| Parametry iniekcji | Wartość |
|-----------------------------------|-----------|
| 1) ciśnienie iniekcji: | |
| a) zakres w [MPa] | 0,6–0,9 |
| b) współczynnik zmienności | 0,14–0,19 |
| 2) objętość zaczynu cementowego: | |
| a) zakres w [dm ³] | 358–639 |
| b) współczynnik zmienności | 0,09–0,28 |
| 3) czas iniekcji [min] | 257–446 |
| 4) podniesienie głowicy pala [mm] | 0,86–2,31 |

5. Podsumowanie

Wzmocnienie pali pojedynczych, wchodzących w skład grup palowych, ma niewątpliwie wpływ na pracę całego fundamentu i spoczywającej na nim konstrukcji. Zadaniem inżyniera projektanta oraz wykonawcy powinno być także dobranie technologii, aby w maksymalny sposób wy-

korzystać naturalne warunki gruntowe. Panujący w podłożu pierwotny stan naprężenia powinien być wykorzystany w celu maksymalnego przeniesienia przez pale obciążeń pionowych i poziomych.

Przytoczone przykłady dla pali posadowionych w iłach pęczniących jednoznacznie potwierdzają duże możliwości przeniesienia zwiększonych obciążeń przy zastosowaniu technologii iniekcji pod podstawami pali. Dla pali nowo projektowanych zastosowanie iniekcji pod podstawą prowadziło do wyraźnego zmniejszenia osiadań w zakresie obciążeń roboczych i zauważalnego zwiększenia nośności całkowitej [1, 2, 5]. W kontekście projektowania całej konstrukcji, a nie tylko samego fundamentu, korzyści technologiczne i ekonomiczne są jednoznacznie pozytywne.

Zmienne warunki geotechniczne i technologiczne dla konkretnego pala mogą być łatwo eliminowane przez zastosowanie adekwatnych parametrów iniekcji. Zapewnia to wyrównanie pracy całej konstrukcji, porównywalną sztywność poszczególnych podpór oraz ekonomiczną i bezpieczną pracę całej budowli.

Literatura

1. Gwizdała K.: *Pale i fundamenty palowe. Projektowanie i realizacja wzmocnień*. XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła, 17–20 marca 2009.
2. Gwizdała K., Pinkowski A.: *Wpływ iniekcji pod podstawą na osiadanie pali wierconych w piaskach*. „Inżynieria i Budownictwo” 2007, nr 7–8, s. 379–381.
3. Jarominiak A., Folta L.: *O wpływie wody zawartej w mieszance betonowej stosowanej w fundamentach na cechy iłów*. „Inżynieria i Budownictwo” 2003, nr 1.
4. Kumor M.K., Szpakowski K.: *Wytrzymałość na ścinanie strefy kontaktowej ił ekspansywny – beton*. XII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Szczecin–Międzyzdroje, 18–20 maja

2000, s. 377–387.

5. Pinkowski A., Gwizdała K.: *Analiza wpływu iniekcji pod podstawami pali wierconych*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budownictwo” 2006, z. 28.
6. Przysański J.: *Posadowienie budowli na gruntach ekspansywnych*. „Politechnika Poznańska. Rozprawy” 1991, nr 244.
7. Tejchman A., Gwizdała K.: *Application of injection under base of bored piles in cohesive soils*. Proceedings XIII ECSMGE. Prague 2003, s. 399–406.
8. Tejchman A., Gwizdała K.: *Badanie nośności pali wielkośrednicowych pod pylonem mostu podwieszonoego przez Martwą Wisłę w Gdańsku*. „Inżynieria i Budownictwo” 2000, nr 12, s. 662–664.
9. Tejchman A., Gwizdała K.: *Zwiększanie nośności pali wierconych*. XLVII Konferencja Krynica 2001. Opole–Krynica, 16–21 września 2001, t. 3, s. 299–306.
10. Tomlinson M.J.: *Pile design and construction practice*. Fourth edition. London 1994.
11. Materiały Seminarium Instytutu Techniki Budowlanej: *Iły plicieńskie*. Warszawa. Warszawa, 26 lutego 2004.
12. PN-83/B-02482 *Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych*.
13. PN-EN 1536:2001 *Pale wiercone*.
14. PN-EN 12699:2002 *Pale przemieszczeniowe*.
15. PN-EN-12716:2002 *Iniekcja strumieniowa*.
16. EN 1997-1 (2004) *Eurocode 7. Geotechnical Design – Part 1: General Rules*.

ARTYKUŁ UKAZAŁ SIĘ W MATERIAŁACH KONFERENCYJNYCH XV KRAJOWEJ KONFERENCJI MECHANIKI GRUNTÓW I INŻYNIERII GEOTECHNICZNEJ, BYDGOSZCZ, 7–10 LIPCA 2009

R E K L A M A



Produkcja betonu



Budownictwo inżynieryjne

<http://www.imbpodbeskidzie.pl/>

PRZEDSIĘBIORSTWO INŻYNIERYJNE

IMB-PODBESKIDZIE Sp. z o.o.

ul. Górny Bór 31a, 43-430 Skoczów

tel./fax. (033) 853 25 65

e-mail: biuro@imbpodbeskidzie.pl



Zrealizowaliśmy projekty współfinansowane przez UE.



Geoinżynieria

®



Niezależny
i profesjonalny
wykonawca

www.piletest.pl

PRÓBNE OBCIĄŻENIA PALI FUNDAMENTOWYCH

- PRÓBNE OBCIĄŻENIA STATYCZNE I DYNAMICZNE
- BADANIA NOŚNOŚCI Z ZASTOSOWANIEM TENSOMETRÓW I EKSTENSOMETRÓW
- BADANIA CIĄGŁOŚCI SONIC ECHO I CROSS-HOLE SONIC LOGGING
- DORADZTWO TECHNICZNE W ZAKRESIE FUNDAMENTÓW SPECJALNYCH
- APARATURA KONTROLNO-POMIAROWA DLA PALOWNIC

 **PILETEST**