POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
KATEDRA GEOTECHNIKI I DRÓG

L i d i a W A N I K

GEOMETRYCZNE I MECHANICZNE WŁAŚCIWOŚCI KOLUMN INIEKCYJNYCH: BADANIA DOŚWIADCZALNE I PRZEWIDYWANIE

Streszczenie pracy doktorskiej

PROMOTORZY:

Joanna BZÓWKA, dr hab. inż., prof. Pol. Śl.
Politechnika Śląska

Giuseppe MODONI, dr hab. inż., prof. UCSL
Uniwersytet Cassino i Południowego Lazio

GLIWICE, 2016

Zdjęcia użyte na okładce są autorstwa Lidii WANIK
Projekt okładki: Dr Marek GŁOWACKI

Lidia WANIK była beneficjentką programu „DoktoRIS – Programu stypendialnego na rzecz innowacyjnego Śląska" – współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

1. WSTĘP

1.1 Wprowadzenie

Technologia iniekcji strumieniowej (ang. *jet grouting*) jest niewątpliwie jedną z najbardziej popularnych technik wzmacniania słabego podłoża gruntowego. Istota iniekcji w połączeniu z szeroką gamą sprzętu, pozwala ukierunkować działania w miejsca predysponowane, często niedostępne dla innych technologii.

Iniekcja strumieniowa polega na niszczeniu struktury gruntów budujących podłoże oraz ich mieszaniu i częściowej wymianie na czynnik wiążący. Niszczenie struktury gruntu jest uzyskiwane w efekcie działania wysokoenergetycznego strumienia cieczy nazywanej iniektem, która zazwyczaj jest równocześnie czynnikiem wiążącym. Elementy powstające podczas procesu iniekcji nazywa się kolumnami iniekcyjnymi bądź ścianami iniekcyjnymi, w zależności od ich kształtu. Iniekcja strumieniowa może być wykonywana w systemie pojedynczym, podwójnym lub potrójnym. Systemy te różnią się między sobą ilością mediów zastosowanych do odspajania i urabiania gruntu.

Pomimo szerokiej znajomości techniki iniekcji strumieniowej, w dalszym ciągu istnieje potrzeba pogłębiania wiedzy dotyczącej zagadnień projektowych i wykonawczych. W szczególności, dwa główne aspekty praktyczne powinny być w dalszym ciągu szerzej analizowane. Pierwszym z nich jest geometria kolumn iniekcyjnych uzyskana przy danych parametrach technologicznych procesu oraz przy zróżnicowanych warunkach gruntowych. W drugiej kolejności, należałoby przeanalizować zagadnienie wytrzymałości tworzywa gruntowo-cementowego.

Mając na uwadze fakt, iż kolumny iniekcyjne są często elementem nośnym konstrukcji, błędne przewidywanie ich wymiarów bądź wytrzymałości może prowadzić do poważnych w skutkach konsekwencji. Z pomocą przychodzą różne, opisane w literaturze, metody pośrednie przewidywania średnic kolumn, jednakże muszą one być potwierdzone doświadczalnie. Alternatywne rozwiązanie, ale niezawodne, polega na odsłonięciu kolumn i bezpośrednim pomiarze ich geometrii. Jest to jednak metoda kosztowna, czasochłonna, a czasami wręcz niemożliwa do wykonania.

W odniesieniu do wytrzymałości materiału kolumn iniekcyjnych, jest ona weryfikowana poprzez badania wytrzymałościowe próbek pochodzących z wierceń rdzeniowych. Na uwagę zasługuje również fakt, iż dostępne normy regulujące stosowanie iniekcji strumieniowej [N1, N3] nie wskazują jednoznacznie na żądaną minimalną wytrzymałość tworzywa gruntowo-cementowego, a decyzja w tej sprawie w każdym przypadku należy do Projektanta.

1.2 Cel, zakres i teza pracy

Trudności w przewidywaniu i kontrolowaniu geometrii kolumn iniekcyjnych, jak również jakości materiału gruntowo-cementowego niewątpliwie zwiększają koszt, i czas wykonania konstrukcji. Alternatywą do takiego stanu rzeczy jest posiadanie jasnej i rzetelnej wiedzy dotyczącej podstawowych mechanizmów powstałych podczas procesu iniekcyjnego, w celu zrozumienia wpływu parametrów technologicznych na uzyskane wyniki.

Celem pracy doktorskiej jest, za pomocą wyników doświadczalnych i modeli teoretycznych, głębsze zrozumienie skomplikowanego procesu iniekcji strumieniowej i jego wpływu na geometryczne i mechaniczne charakterystyki kolumn iniekcyjnych. W szczególności badania skupiają się na roli czynników technologicznych. W tym celu, zostały wykonane systemem pojedynczym (ang. *single fluid system*) i systemem podwójnym (ang. *double fluid system*) kolumny iniekcyjne na poletku doświadczalnym w Bojszowach Nowych, przy zmiennych parametrach technologicznych. Uzyskane wyniki zostały następnie skonfrontowane z najnowszymi, opisanymi w literaturze, metodami przewidywania średnicy kolumn iniekcyjnych (metoda Flory i in., 2013; metoda Shena i in., 2013; metoda Ochmańskiego i in., 2015).

Poletko doświadczalne składało się z 16 kolumn iniekcyjnych (8 wykonanych systemem pojedynczym oraz 8 wykonanych systemem podwójnym), wykonanych w podłożu piaszczystym przewarstwionym gliną i gruntami organicznymi. Kolumny, każda o długości ok. 4 m, wykonano różnicując system iniekcji (pojedynczy bądź podwójny) oraz parametry technologiczne iniekcji strumieniowej (ciśnienie iniektu p_0, średnicę dysz iniekcyjnych d_0 oraz prędkość obrotową monitora ω). Następnie, kolumny zostały odsłonięte, oczyszczone i pomierzone. Bazując na przewidywaniach teoretycznych i wynikach eksperymentalnych przedstawiono różnice pomiędzy tymi wynikami i zaproponowano nowe wartości niektórych współczynników.

W celu wykonania badań wytrzymałościowych i określenia parametrów mechanicznych materiału kolumn iniekcyjnych (qu_{28}, E, v, c, ϕ) w kolumnach wykonano wiercenia w technice diamentowej, pobierając rdzenie, które następnie zbadano w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej.

Dalsza cześć pracy doktorskiej została poświęcona modelowaniu numerycznemu, jako narzędziu pozwalającemu na zrozumienie i zinterpretowanie skomplikowanych mechanizmów iniekcji strumieniowej. W tym celu, w programie bazującym na metodzie objętości skończonych (ang. *Finite Volume Method* - FVM) FLUENT, stworzono modele numeryczne przedstawiające proces dyfuzji wysokociśnieniowej iniekcji w częściowo nawodnione podłoże. Modele numeryczne, skalibrowane na podstawie danych eksperymentalnych dostępnych w literaturze (de Vleeschauwer i Maertens, 2000; Modoni i in., 2016) zostały wykorzystane do analizy wpływu zmiennych parametrów iniekcji (ciśnienia iniekcji p_0 wyrażonego przez prędkość początkową iniektu V_0, średnicy dysz

iniekcyjnych d_0 oraz gęstości iniektu ρ) na dystrybucję prędkości iniektu. Wyniki analiz numerycznych są również skonfrontowane z formułami matematycznymi (Modoni i in., 2006), opisującymi dystrybucję prędkości iniektu w zależności o średnicy dyszy d_0, prędkości początkowej V_0 i gęstości iniektu ρ. Ostatnia część analiz numerycznych dotyczy wpływu zastosowania dodatkowego medium, jakim jest sprężone powietrze (w przypadku stosowania podwójnego systemu iniekcji), na koncentrację i dystrybucję prędkości strumienia iniektu.

Mając na uwadze powyższe, teza pracy doktorskiej została zdefiniowana następująco: **charakterystyka geometryczna i mechaniczna materiału kolumn iniekcyjnych zależy od: rodzaju podłoża w jakim wykonano kolumny, rodzaju użytego systemu iniekcji strumieniowej oraz parametrów technologicznych procesu iniekcji**.

1.3 Układ pracy

Rozprawa doktorska składa się z rozdziału wprowadzającego, sześciu rozdziałów zasadniczych, rozdziału podsumowującego i trzech załączników. Rozdziały zasadnicze pracy wymieniono poniżej wraz z krótkim opisem ich zawartości.

- Rozdział 2 opisuje proces technologiczny iniekcji strumieniowej oraz występujące w nim mechanizmy.

- Rozdział 3 poświęcony jest symulacjom numerycznym, odzwierciedlającym proces dyfuzji wysokociśnieniowej iniekcji. Kolejna część analiz numerycznych dotyczy wpływu zastosowania dodatkowego medium: sprężonego powietrza na koncentrację i dystrybucję prędkości strumienia iniektu.

- Rozdział 4 skupia się na geometrycznych i mechanicznych charakterystykach kolumn iniekcyjnych. Przedstawia dane eksperymentalne zaczerpnięte z literatury, opisuje algorytmy przewidywania średnic kolumn iniekcyjnych w oparciu o najnowszą literaturę światową oraz wyszczególnia metody kontroli geometrii kolumn iniekcyjnych. Druga część rozdziału poświęcona jest właściwościom mechanicznym materiału kolumn.

- W rozdziale 5 opisano, stworzone na potrzeby pracy doktorskiej, poletko doświadczalne w Bojszowach Nowych. Przedstawiono w nim rezultaty rozpoznania warunków gruntowo-wodnych podłoża oraz układ i parametry technologiczne wykonanych kolumn iniekcyjnych.

- Pomiary średnicy odsłoniętych kolumn iniekcyjnych przedstawiono w rozdziale 6. Następnie wykonano porównanie obliczeń przewidywanych średnic kolumn z wartościami pomierzonymi. Ostatnia część rozdziału dotyczy propozycji ulepszenia metod literaturowych poprzez zmianę wartości niektórych współczynników.

- W rozdziale 7 przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych materiału kolumn iniekcyjnych wykonanych na poletku doświadczalnym. Druga część rozdziału koncentruje się na wytrzymałości materiału iniekcyjnego w odniesieniu do jego składu mineralogicznego.

W tym celu na materiale kolumn iniekcyjnych wykonano badania dyfrakcji rentgenowskiej, analizy termicznej, termograwimetrii i skaningowego mikroskopu elektronowego, aby określić różnorodność właściwości mechanicznych kolumn formowanych systemem pojedynczym i podwójnym.

- Ostatni rozdział stanowi podsumowanie całej pracy oraz przedstawia zalecenia do dalszych badań.

2. PROCES INIEKCJI STRUMIENIOWEJ

2.1 Wprowadzenie

O iniekcji strumieniowej do tej pory napisano i powiedziano wiele. Jest to jednak technika, w której ciągle jeszcze można cos rozwijać, analizować i szukać nowych rozwiązań (Bzówka, 2009).

Iniekcja strumieniowa charakteryzuje się wieloma zaletami. Jedną z nich, jest niewątpliwie fakt, iż w przeciwieństwie do innych technologii, pozwala na formowanie brył gruntowo-cementowych w niemalże dowolnej formie geometrycznej, w wymaganym miejscu, często również na ograniczonej przestrzeni i wewnątrz budynków (rys. 2.1).

Rys. 2.1 Formowanie kolumn iniekcyjnych w ograniczonym miejscu lub wewnątrz budynku (Wanik K., 2010, 2013)

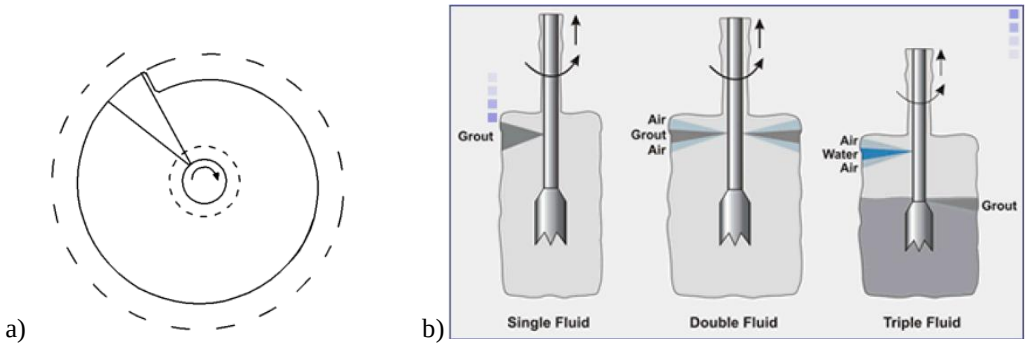
W zależności od wymaganej średnicy oraz rodzaju podłoża gruntowego stosowane są następujące odmiany iniekcji strumieniowej (Wanik L. i Bzówka, 2012) (rys. 2.2):

- **system pojedynczy** (ang. *single fluid system*) – tłoczony jest iniekt, ciśnienie iniekcji wynosi 30÷50 MPa,

- **system podwójny** (ang. *double fluid system*) – w systemie tym tłoczony jest iniekt oraz sprężone powietrze albo woda; w pierwszym przypadku ciśnienie tłoczonego zaczynu wynosi 30÷50 MPa, ciśnienie sprężonego powietrza wynosi od 0,5 do 1,7 MPa; w drugim przypadku woda tłoczona jest pod ciśnieniem 30÷50 MPa, a zaczyn pod ciśnieniem od 2 do 10 MPa,

- **system potrójny** (ang. *triple fluid system*) – tłoczony jest iniekt, woda oraz sprężone powietrze. Ciśnienie iniekcji wynosi od 2 do 10 MPa, woda tłoczona jest pod ciśnieniem 30÷50 MPa, sprężone powietrze 0,5÷1,7 MPa.

Każdy z poszczególnych rodzajów iniekcji strumieniowej ma swoje zalety i uwarunkowania stosowania. Wymiary kolumn iniekcyjnych wykonywanych systemem pojedynczym nie są tak duże, jak systemem podwójnym i potrójnym, jednakże system pojedynczy to system najprostszy w mechanizmie działania, a przez to powszechnie stosowany (Croce i Flora, 2000).



Rys. 2.2 Proces iniekcji strumieniowej: a) przekrój poprzeczny (Wanik L. i Modoni, 2012), b) rodzaje iniekcji strumieniowej (Heng, 2008)

Projektowanie i wykonawstwo posadowień pośrednich wykonywanych w technologii iniekcji strumieniowej w dużej mierze bazuje na doświadczeniach firm stosujących tę technikę. Dzięki wykorzystaniu wzorów empirycznych oraz próbnych obciążeń kolumn iniekcyjnych określenie i zbadanie dopuszczalnej nośności kolumn nie stanowi większego problemu. Problem pojawia się, gdy na etapie projektowania należy określić rzeczywistą średnicę kolumn iniekcyjnych.

Do najważniejszych czynników mających wpływ na uzyskiwaną geometrię kolumn iniekcyjnych można zaliczyć:

- rodzaj i stan gruntu, w którym jest formowana kolumna,
- rodzaj systemu iniekcji strumieniowej,
- ciśnienie iniekcji (p_0) bądź przepływ (Q),
- prędkość podciągania żerdzi iniekcyjnej (V_s),
- prędkość obrotową żerdzi iniekcyjnej (ω),
- liczbę i średnicę dysz iniekcyjnych (M, d_0),
- stosunek c/w zaczynu cementowego (Ω) ,
- zużycie cementu (kg/mb kolumny lub kg/m^3 zaczynu) (Wanik L. i Bzówka, 2012).

W zależności od wyżej wymienionych czynników, pobocznica kolumn może przybierać różne kształty (rys. 2.3).

a) b)

Rys. 2.3 Pobocznica kolumny iniekcyjnej wykonanej w: a) piaskach (zdj. własne), b) w pyłach (Gokalp i Duzceer, 2002)

Przewidywanie zależności średnicy kolumn iniekcyjnych, w nawiązaniu do zastosowanych parametrów technologicznych, jest jednym z głównych problemów skutecznego projektowania. W praktyce inżynierskiej, wybór parametrów odbywa się w oparciu o wcześniejsze doświadczenia danej firmy wykonawczej, jak również po wykonaniu kolumn próbnych na poletkach doświadczalnych. Modelowanie teoretyczne, pomimo iż bardzo trudne, stanowi klucz do właściwego zrozumienia podstawowych mechanizmów powstałych podczas procesu wysokociśnieniowej iniekcji w podłoże gruntowe, jak również do poprawy jego efektywności (Wanik L. i Modoni, 2012). Analizy teoretyczne procesu powinny skupiać się na 2 mechanizmach (Croce i in., 2014):

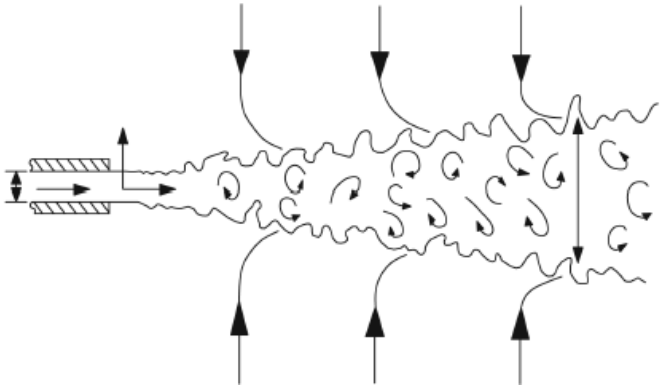
- propagacji iniektu w przestrzeni pomiędzy dyszą iniekcyjną a podłożem gruntowym,
- interakcji pomiędzy iniektem a gruntem.

2.2 Mechanizm iniekcji strumieniowej

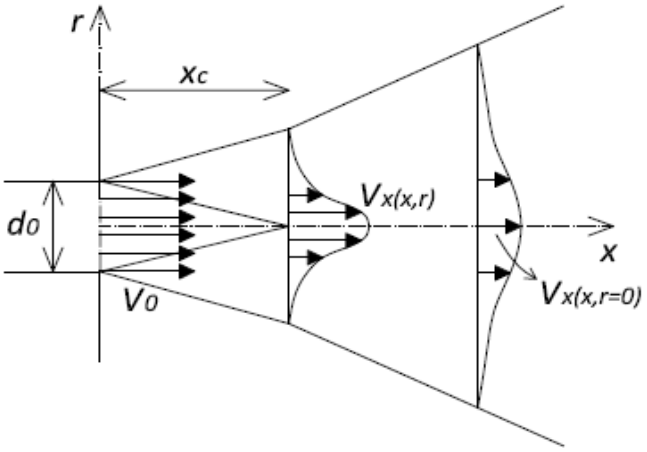
Iniekcja strumieniowa jest złożonym procesem hydraulicznego rozluźniania gruntu w warunkach silnej turbulencji. Ze względu na ograniczone możliwości wykonania odpowiednich pomiarów in situ i badań modelowych oraz trudności obserwacji procesu iniekcji zachodzącego w podłożu gruntowym, jest to zjawisko nie do końca rozpoznane. Dotychczasowe próby odwzorowania tego zjawiska (np. de Vleeschauwer i Maertens, 2000; di Natale i Greco, 2000) wykonane na próbach wypływu wody, nie przyniosły zadowalających rezultatów.

Podstawy procesu iniekcji strumieniowej można poznać rozważając wypływ i oddziaływanie na podłoże gruntowe skoncentrowanego strumienia iniektu charakteryzującego się bardzo dużą energią kinetyczną (wzór (4.3), 5÷30 MJ/m). Po wypływie z dyszy i przebyciu drogi wokół żerdzi wiertniczej (wypełnionej mieszaniną urobku i wody) skoncentrowany strumień iniektu trafia w grunt, powodując jego rozluźnienie i częściowe wypłukanie na powierzchnię. Pod wpływem działania silnej turbulencji, kształt skoncentrowanego strumienia iniektu stopiono ulega zmianie i wytraca początkową prędkość

(rys. 2.4÷2.5). W zależności od rodzaju gruntu, proces erozji przebiega inny sposób (szerzej opisane w pracy doktorskiej).



Rys. 2.4 Rysunek przedstawiający dyfuzyjny charakter strumienia iniektu (Modoni i in., 2016)



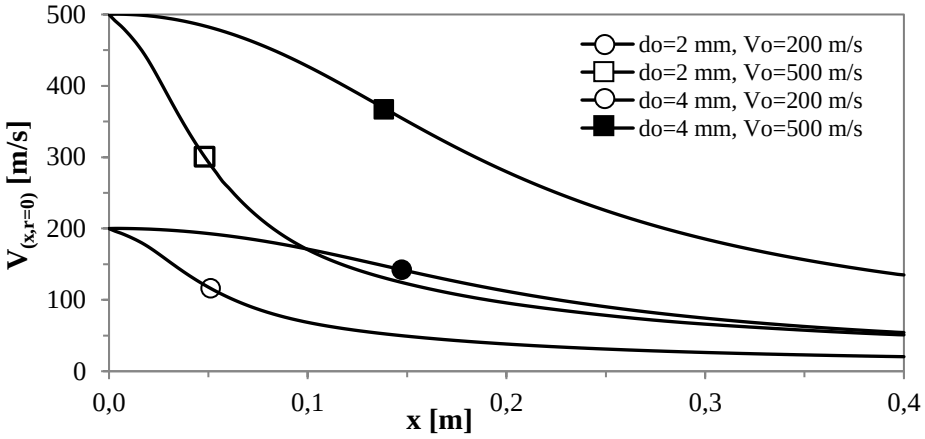
Rys. 2.5 Uproszczona geometria strumienia iniektu (Modoni i in., 2016)

3. MODELOWANIE NUMERYCZNE INIEKCJI STRUMIENIOWEJ

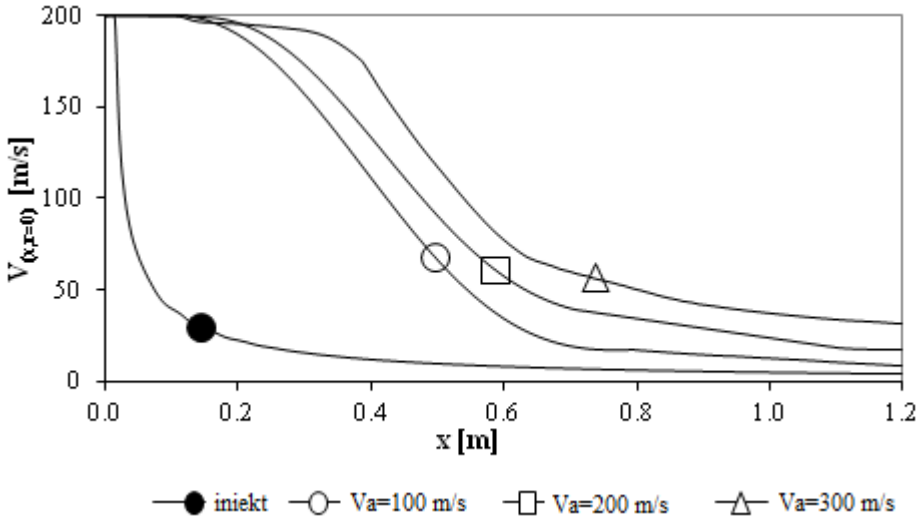
Celem analiz numerycznych było odwzorowanie turbulentnego charakteru przepływu cieszy (zaczynu cementowego) i zbadanie charakterystyki jego zasięgu oddziaływania w zależności od zmiennej początkowej energii kinetycznej strumienia iniektu E'_n (wzór 4.3). Kolejnym celem badań była analiza wpływu dodatkowego medium (sprężonego powietrza, jak w przypadku stosowania podwójnego systemu iniekcji strumieniowej) na zasięg oddziaływania skoncentrowanego strumienia iniektu.

Analizy przeprowadzono dla różnych wartości prędkości początkowej iniektu V_0: 200÷500 m/s oraz średnicy dysz d_0: 2,2÷6,0 mm, prędkość powietrza zamodelowano w trzech wariantach (100, 200 i 300 m/s). Do obliczeń wykorzystano program Fluent (z pakietu ANSYS), pozwalający na odwzorowanie przepływu w warunkach silnej turbulencji.

Wyniki analiz numerycznych przedstawiono na rysunkach 3.1÷3.2.



Rys. 3.1 Rozkład prędkości początkowej iniektu w zależności od wartości V_0, d_0 (Modoni i in., 2016)



Rys. 3.2 Wpływ dodatku sprężonego powietrza na zasięg oddziaływania strumienia iniektu (Modoni i in., 2016)

Przeprowadzone analizy potwierdziły, iż zasięg oddziaływania strumienia iniektu zależy od użytej energii kinetycznej strumienia przy dyszy iniekcyjnej E'_n oraz pozytywnego wpływu stosowania dodatkowego medium (powietrza) na efektywność iniekcji.

4. CHARAKTERYSTYKA GEOMETRYCZNA I MECHANICZNA INIEKCJI STRUMIENIOWEJ

4.1 Charakterystyka geometryczna

4.1.1 Wprowadzenie

Tak jak wspomniano wcześniej (rozdz. 2), średnica kolumn iniekcyjnych zależy od wielu czynników, które w skrócie można podzielić na: rodzaj podłoża gruntowego, rodzaj przyjętego systemu iniekcji oraz parametry technologiczne formowania.

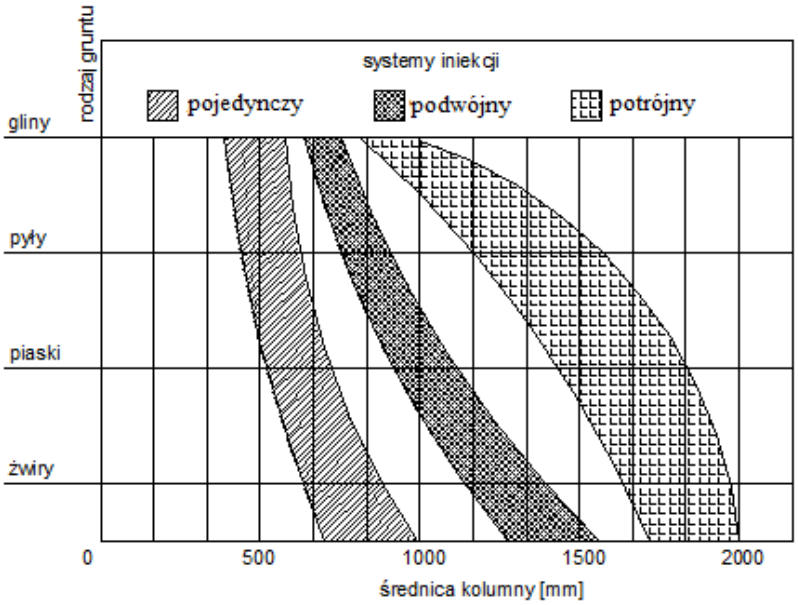
W literaturze można znaleźć informacje na temat uzyskiwanych średnic, w zależności od rodzaju gruntu i użytego systemu iniekcji (tab. 4.1÷4.2; rys. 4.1÷4.2). Pomimo, iż przedziały te różnią się nieco między sobą, wspólny mianownik jest zawsze ten sam: największe średnice kolumn uzyskuje się w gruntach niespoistych charakteryzujących się dużym uziarnieniem przy zastosowaniu potrójnego systemu iniekcji strumieniowej. Im mniej mediów tłoczonych w podłoże gruntowe, tym średnica kolumn jest mniejsza. Jednocześnie należy nadmienić, iż powszechnie stosowanym w Polsce systemem iniekcji strumieniowej, jest system pojedynczy, ze względu na jego prostotę, w stosunku do pozostałych rodzajów.

Tablica 4.1 Przedział oczekiwanej wielkości średnicy kolumny iniekcyjnej w zależności od rodzaju gruntu (Bzówka, 2009 zaczerpnięte z Bell, 1993)

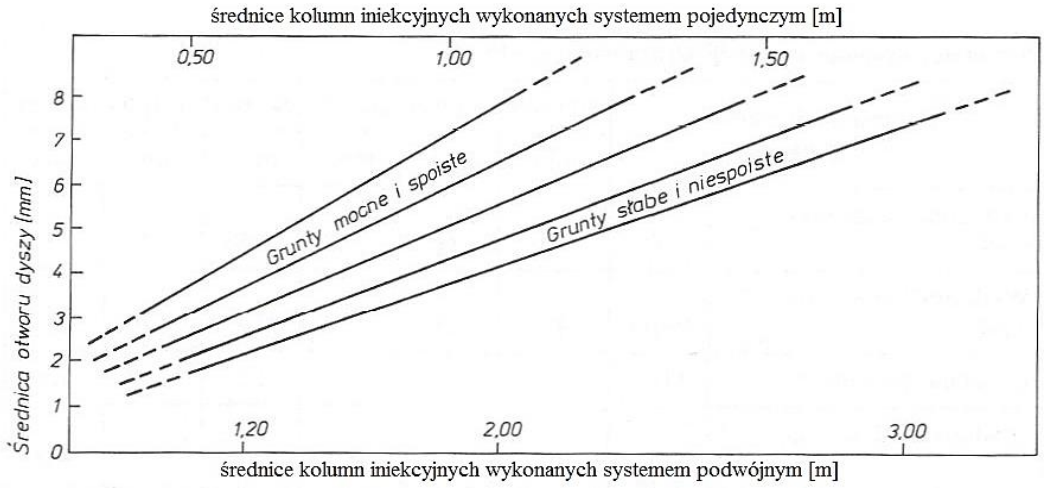
Rodzaj gruntu	**Średnica kolumny[m] System pojedynczy**	**Średnica kolumny[m] System potrójny**
C Pyły, gliny	0.4 ÷ 0.5	0.8 ÷ 1.0
B Piaski pylaste	0.8 ÷ 0.9	1.4 ÷ 1.6
A Pospółki	0.9 ÷ 1.0	2.0 ÷ 2.4

Tablica 4.2 Średnice kolumn iniekcyjnych w zależności od systemu iniekcji i rodzaju podłoża (Croce i in., 2014)

System iniekcji	**Średnica kolumny [m]**			
	Iły	**Gliny i pyły**	**Piaski pylaste**	**Piaski i/lub żwiry**
System pojedynczy	nie rekomendowane	0.4 ÷ 0.8	0.6 ÷ 1.0	0.6 ÷ 1.2
System podwójny	0.5 ÷ 1.0	0.6 ÷ 1.3	1.0 ÷ 2.0	1.2 ÷ 2.5
System potrójny	0.8 ÷ 1.5	1.0 ÷ 1.8	1.2 ÷ 2.5	1.5 ÷ 3.0



Rys. 4.1 Zależność pomiędzy średnicą kolumn a rodzajem gruntu i systemem iniekcji (Gwizdała i Kościk, 2005)



Rys. 4.2 Prognozowanie średnicy kolumn iniekcyjnych dla systemu pojedynczego i podwójnego (Jarominiak, 2000)

4.1.2 Metody przewidywania średnic kolumn iniekcyjnych

W literaturze światowej można znaleźć modele teoretyczne opisujące zjawisko iniekcji strumieniowej (np. Chu, 2005; Modoni i in., 2006; Heng, 2008; Wang i in., 2012). Jednakże ze względu na ich złożoność, a jednocześnie brak uwzględniania parametrów technologicznych oraz reakcji podłoża nie są one stosowane w praktyce inżynierskiej (Croce i in., 2014). Alternatywę stanowią formuły empiryczne, które z kolei nie uwzględniają właściwości mechanicznych podłoża gruntowego.

W rozdziale 4.1.2 przedstawiono trzy metody przewidywania średnic kolumn iniekcyjnych, w zależności od użytego systemu iniekcji strumieniowej, rodzaju gruntu budującego podłoże gruntowe oraz parametrów technologicznych iniekcji. Na chwilę obecną są to jedyne metody analityczne, pozwalające uwzględnić większość czynników, mających wpływ na geometrię kolumn iniekcyjnych (tak jak inne metody, nie uwzględniają one czynnika ludzkiego, który ma również bardzo duże znaczenie).

Metoda Flory i in. (2013)

Metoda Flory bazuje na erozyjnym działaniu strumienia iniektu i odporze gruntu. Zaletą tej metody jest fakt, iż średnica kolumn iniekcyjnych może być interpolowana na głębokości. W zależności od rodzaju gruntu budującego podłoże, średnicę kolumn oblicza się z następujących wzorów:

- dla gruntów spoistych (E'_n w MJ/m i q_c in MPa):

$$\boldsymbol{D_a = D_{ref} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \Lambda^* \cdot E'_n}{7.5 \cdot 10}\right)^{\beta} \cdot \left(\frac{q_c}{1.5}\right)^{\delta}} \tag{4.1}$$

- dla gruntów niespoistych (E'_n w MJ/m):

$$\boldsymbol{D_a = D_{ref} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \Lambda^* \cdot E'_n}{7.5 \cdot 10}\right)^{\beta} \cdot \left(\frac{N_{SPT}}{10}\right)^{\delta}} \tag{4.2}$$

gdzie:

D_{ref} - średnica referencyjna: dla kolumny wykonanej systemem pojedynczym przy następujących wartościach parametrów: ω=1, E'_n=10 MJ/m, q_c=1.5 MPa lub N_{SPT}=10 (w zależności od rodzaju gruntu),

α - bezwymiarowy parametr uwzględniający zastosowanie dodatkowego medium: sprężonego powietrza (α=1 dla systemu pojedynczego, α>1 dla systemu podwójnego i potrójnego) (tab. 4.3),

Λ^* - bezwymiarowy parametr zależny od stosunku cementowo/wodnego (Ω), Λ^*=7.5 dla Ω=1; dla systemu potrójnego, w którym woda jest stosowana jako medium tnące grunt (Ω=0), wartość parametru Λ^* wynosi 16 (Croce i in., 2014),

E'_n - energia kinetyczna strumienia iniektu przy dyszy iniekcyjnej (ang. *the kinetic energy at the nozzle*)* - wzór (4.3),

β, δ - bezwymiarowe parametry wyznaczone na podstawie studium literaturowego i własnych doświadczeń Flory i in.: β=0.2 i δ=-0.25 (tab. 4.3),

q_c - pomierzony opór stożka wyznaczony przy użyciu sondy CPT,

N_{SPT} - opór penetracji wyznaczony przy użyciu sondy SPT.

* energię kinetyczną strumienia iniektu przy dyszy iniekcyjnej E'_n (ang. *the kinetic energy at the nozzle*) można obliczyć z następującego wzoru:

$$E'_n = \frac{\Pi}{8} \cdot \frac{M\rho d_0^2 V_0^3}{V_s} \tag{4.3}$$

gdzie:

M - ilość dysz iniekcyjnych, ρ - gęstość iniektu, d_0 - średnica dyszy iniekcyjnej, V_0 - prędkość początkowa iniektu, V_S - prędkość podciągania monitora.

W przypadku, gdy nie znamy wszystkich parametrów ze wzoru (4.3), możemy posiłkować się następującym wzorem, który uwzględnia straty energii pomiędzy pompą a monitorem:

$$E'_n \approx 0.9E'_p \tag{4.4}$$

gdzie:

E'_p - energia iniektu (mierzona na pompie), obliczana ze wzoru: $E'_p = \frac{pQ}{V_S}$ (p - ciśnienie na pompie, Q - przepływ, V_s - prędkość podciągania monitora).

Tablica 4.3 Wartości parametrów zastosowanych we wzorach (4.1) i (4.2) do przewidywania średnic kolumn iniekcyjnych (Flora i in., 2013)

Rodzaj gruntu		**D_{ref} (m)**	**β**	**δ**	**α (system pojedynczy)**	**α (system podwójny i potrójny)**
niespoiste	żwiry, piaski grube i średnie	1.00	0.20	-0.25	1	6
	piaski średnie, drobne, pylaste	0.80				
spoiste	pyły, gliny i gr. organiczne	0.50				

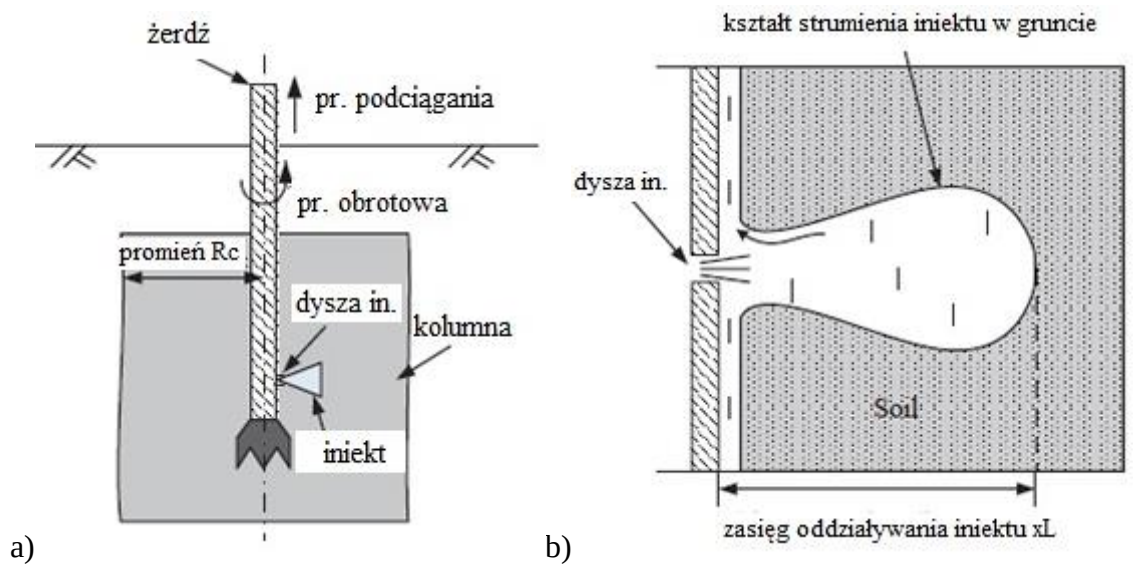
Metoda Shena i in. (2013)

Podobnie jak metoda Flory i in. (2013), metoda ta bazuje na mechanizmie turbulentnego przepływu iniektu oraz erozji podłoża. Uwzględnia ona rodzaj systemu iniekcji, parametry technologiczne systemu, właściwości tłoczonego medium oraz podłoża gruntowego. Ze względu na złożoność metody obliczenia średnicy kolumn, w streszczeniu podano tylko wzór główny, natomiast cały algorytm został szczegółowo opisany w pracy doktorskiej. Średnicę kolumn można wyliczyć według następującego wzoru:

$$\boldsymbol{D_0 = 2R_c = 2\eta x_L + D_r} \tag{4.5}$$

gdzie:

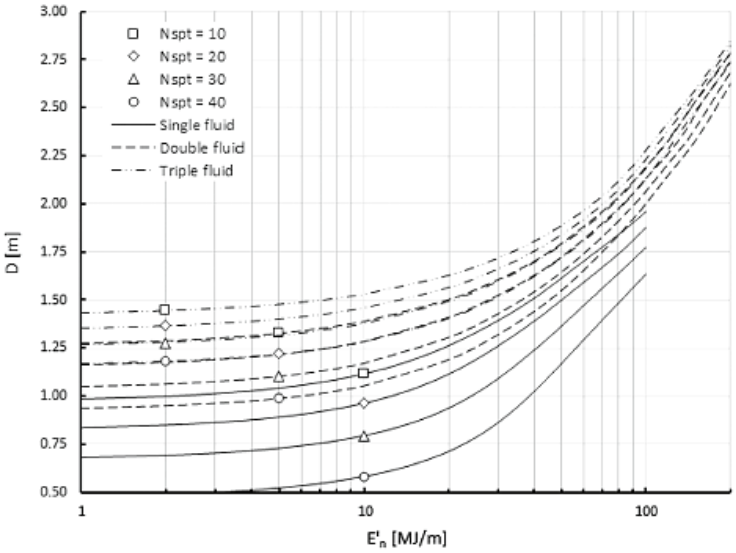
R_c - promień kolumny (rys. 4.3a),
D_r - średnica monitora,
x_L - zasięg oddziaływania iniektu (ang. *ultimate erosion distance*) (rys. 4.3b).



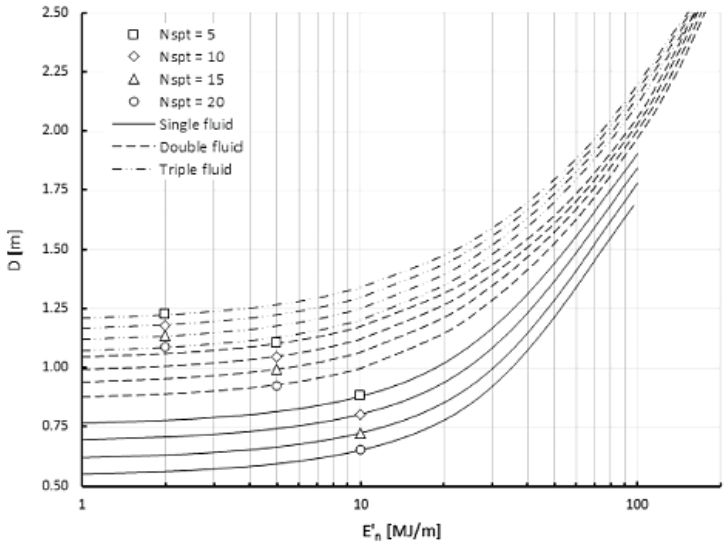
Rys. 4.3 Schemat iniekcji strumieniowej (Shen i in., 2013)

Metoda Ochmańskiego i in. (2015)

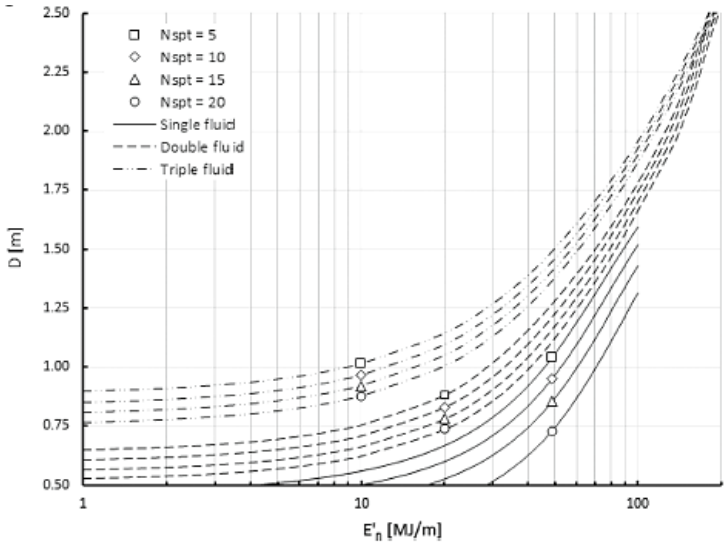
W odróżnieniu od dwóch poprzednio opisanych metod, metoda Ochmańskiego i in. bazuje na algorytmie sztucznej sieci neuronowej (ang. *Artifical Neural Network - ANN*). Na podstawie danych wprowadzonych do sztucznej sieci neuronowej, uzyskano następujące wykresy uwzględniające przewidywaną średnicę kolumny w zależności od: systemu iniekcji, rodzaju podłoża gruntowego (wyrażonego przez N_{SPT}) oraz użytej energii kinetycznej strumienia iniektu przy dyszy iniekcyjnej E'_n. Warto nadmienić, iż proces „uczenia sieci" bazował na tych samych danych doświadczalnych, co kalibracja modelu Flory i in. (2013) (tabele 4.5÷4.7 zamieszczone w pracy doktorskiej).



a)



b)



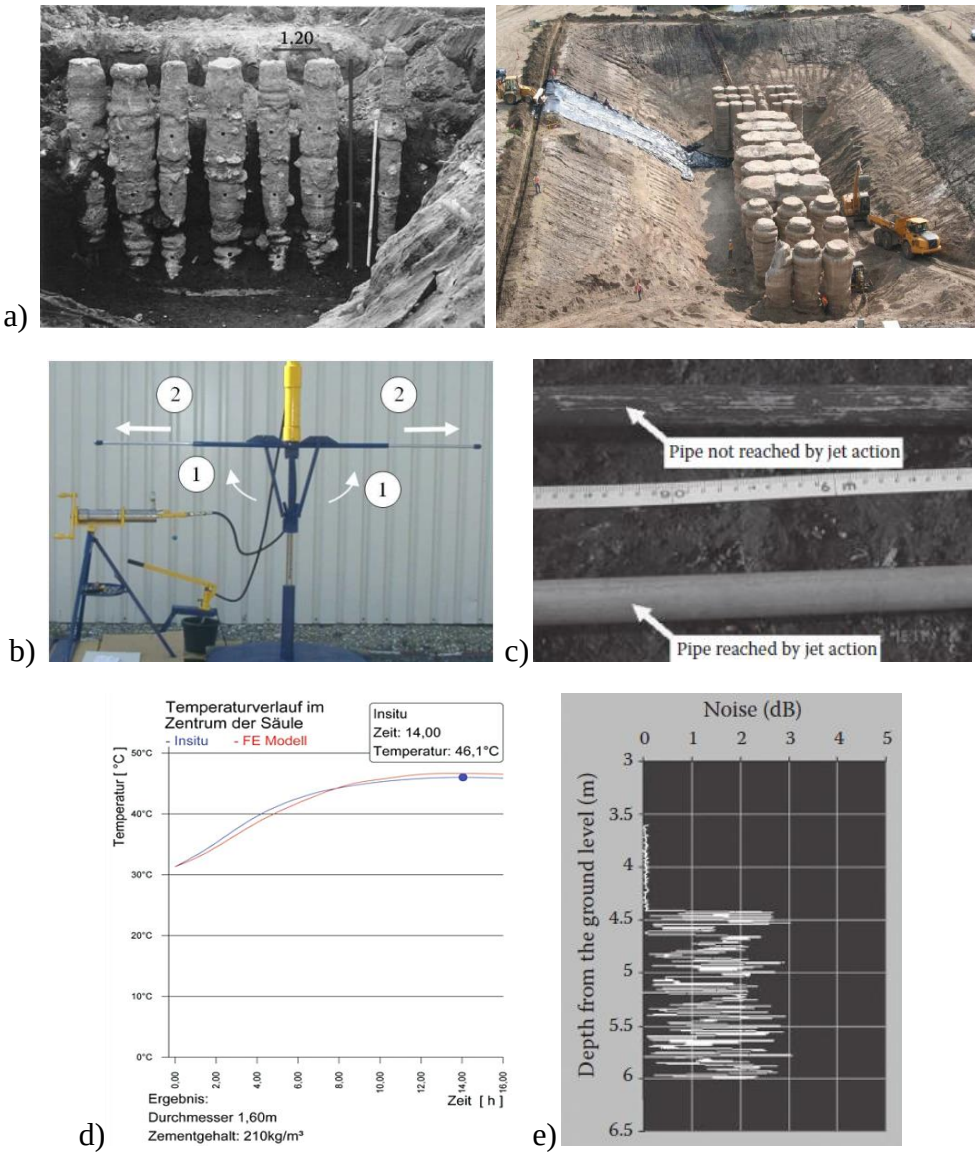
c)

Rys. 4.4 Przewidywanie średnicy kolumn iniekcyjnych przy użyciu sztucznej sieci neuronowej dla: a) żwirów, piasków grubych i średnich, b) piasków drobnych i pylastych, c) gruntów spoistych (Ochmański i in., 2015)

Opisane metody przewidywania średnic kolumn iniekcyjnych uwzględniają czynniki mające wpływ na geometrię kolumn iniekcyjnych. Z praktycznego punktu widzenia metoda Flory i in. (2013) jest „najwygodniejsza” do stosowania, ze względu na prostotę obliczeń. Porównanie wyników przewidywania średnic kolumn według opisanych metod oraz wartości rzeczywistych przedstawiono w rozdziale 6.2

4.1.3 Kontrola średnicy kolumn iniekcyjnych

W rozdziale tym omówiono metody kontroli uzyskanych średnic kolumn iniekcyjnych. Ogólnie metody można podzielić na metody bezpośrednie (bezpośredni pomiar średnicy kolumn) i metody pośrednie (bazujące na pomiarze innych zmiennych niż średnica i w konsekwencji określających średnicę kolumn). Na rysunku 4.5 zaprezentowano przykłady wykorzystania poszczególnych metod pomiaru średnicy kolumn.

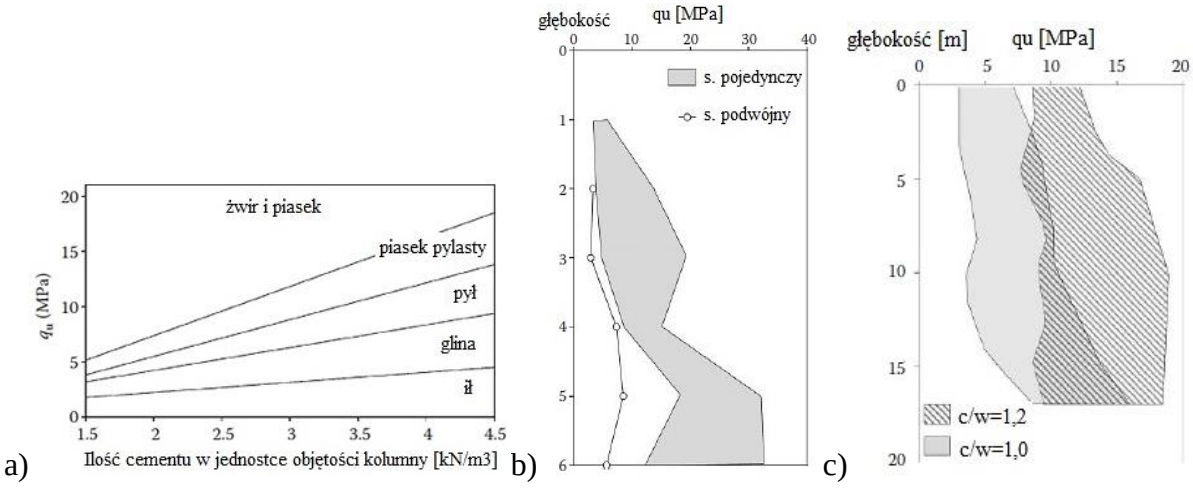


Rys. 4.5 Kontrola średnicy kolumn iniekcyjnych: a) pomiar bezpośredni po uprzednim odsłonięciu kolumn (Croce i in., 2014; Stark i in., 2009); b) pomiar przy użyciu „parasola” (ang. *calliper*) (Topolnicki, 2011); c) pomiar średnicy poprzez pomalowane pręty pomocnice „odrapane” z farby, gdy dosięgnie ich strumień iniekcyjny (Croce i in., 2014), d) pomiar temperatury wewnątrz kolumny i otaczającym podłożu (Meinhard, 2012), e) informacja o średnicy kolumny przy użyciu hydrofonów (Croce i in., 2014)

4.2 Charakterystyka mechaniczna

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (q_u) materiału gruntowo-cementowego zależy od rodzaju gruntu budującego podłoże, użytego systemu iniekcji strumieniowej oraz stosunku cementowo/wodnego Ω tłoczonego zaczynu. Najwyższe wartości wytrzymałości uzyskuje się w gruntach niespoistych, przy zastosowaniu systemu pojedynczego; im większa ilość tłoczonego cementu, tym wartość wytrzymałość jest wyższa (rys. 4.6).

Należy również nadmienić, iż rzeczywiste wartości wytrzymałości tworzywa gruntowo-cementowego są mniejsze. Wynika to z faktu, iż materiał gruntowo-cementowy nie zawsze jest w pełni jednorodny, a próbki badane w laboratorium to te, które udało się pobrać bez uszkodzeń podczas wierceń i reprezentują najlepsze fragmenty kolumny. Nie dziwi więc fakt, iż współczynnik zmienności wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie tworzywa gruntowo-cementowego mieści się w przedziale 30÷75% (Toraldo, 2016).



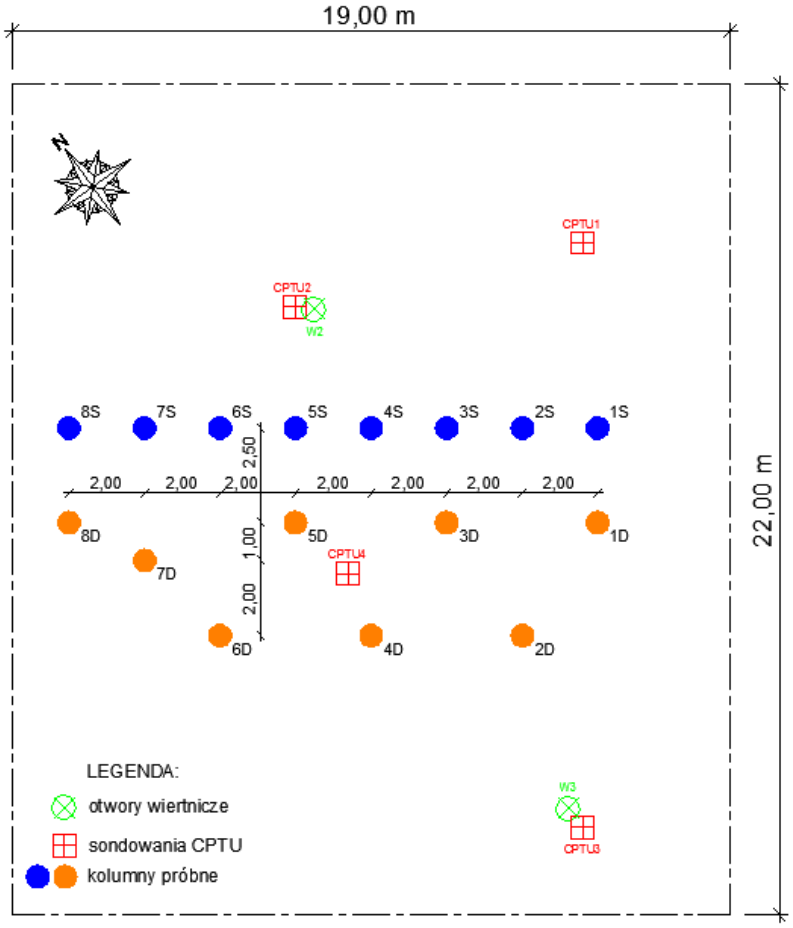
Rys. 4.6 Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie materiału gruntowo-cementowego w zależności od: a) ilości cementu w jednostce objętości kolumny, b) zastosowanego systemu iniekcji strumieniowej, c) stosunku cementowo-wodnego Ω tłoczonego zaczynu (Croce i in., 2014)

W celu wyznaczenia wartości parametrów Coulomba-Mohra tworzywa gruntowo-cementowego: kąta tarcia wewnętrznego φ i spójności c, wykonuje się badania w specjalnie do tego przygotowanym aparacie trójosiowego ściskania. Dane literaturowe (Croce i in., 2014) pokazują, iż trudno jest określić zależność pomiędzy wartościami φ i c, a rodzajem gruntu wchodzącym w skład badanej próbki.

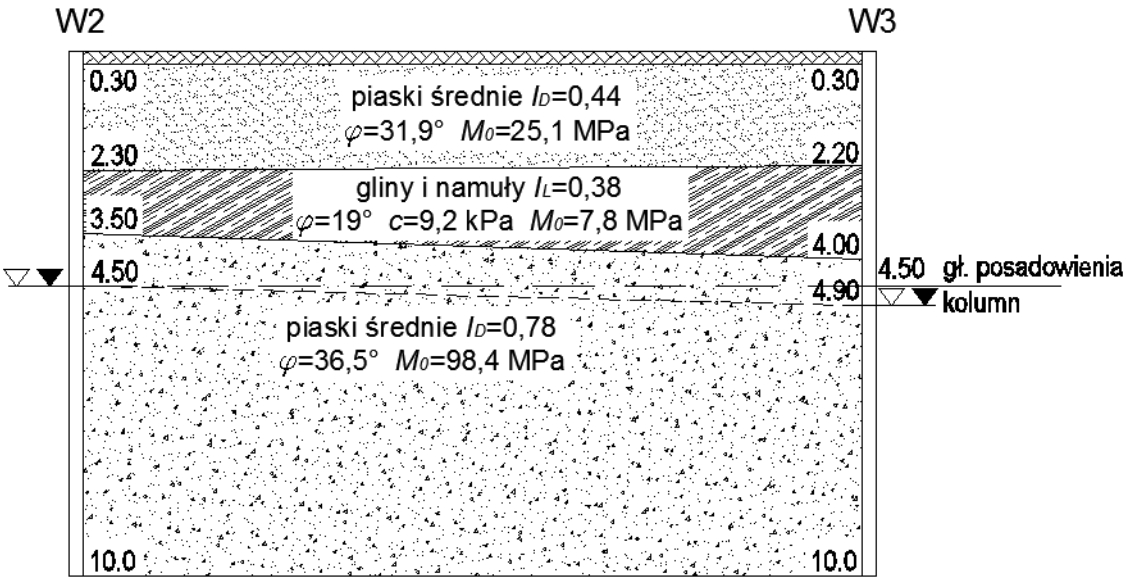
5. CHARAKTERYSTYKA POLETKA DOŚWIADCZALNEGO W BOJSZOWACH NOWYCH

Na potrzeby pracy doktorskiej wykonano kolumny próbne na poletku doświadczalnym, udostępnionym przez przedsiębiorstwo PPI Chrobok S.A. w Bojszowach Nowych. Przed formowaniem kolumn dokonano rozpoznania geologicznego podłoża poprzez wykonanie dwóch odwiertów i czterech sondowań CPTU, każdy o długości 10 m (rys. 5.1).

Granice litostratygraficzne wraz z granicami warstw geotechnicznych i uśrednione wartości parametrów geotechnicznych poszczególnych warstw przedstawiono na przekroju geotechnicznych na rysunki 5.2.



Rys. 5.1 Plan sytuacyjny poligonu doświadczalnego wraz z lokalizacją sondowań CPTU i wierceń badawczych



Rys. 5.2 Przekrój geotechniczny podłoża poletka doświadczalnego wraz z uśrednionymi wartościami parametrów geotechnicznych poszczególnych warstw (Geostandard, 2012)

Poligon doświadczalny tworzyło 16 kolumn iniekcyjnych: 8 sztuk wykonanych systemem pojedynczym (1S÷8S) oraz 8 sztuk wykonanych systemem podwójnym (1D÷8D) (rys. 5.1), każda o długości 4 m.

W celu wyznaczenia właściwości geometrycznych i mechanicznych kolumn iniekcyjnych, wykonano je różnicując system iniekcji strumieniowej (pojedynczy lub podwójny) oraz następujące parametry technologiczne: ciśnienie początkowe p_0, średnicę dysz iniekcyjnych d_0 oraz prędkość obrotową żerdzi iniekcyjnej ω. Pozostałe parametry iniekcji przyjęto takie same dla każdej z kolumn (tab. 5.1÷5.2).

Tablica 5.1 Parametry formowania kolumn iniekcyjnych na poletku doświadczalnym w Bojszowach Nowych

Zaczyn cementowy	gęstość ρ_g = 1,5 g/cm^3
	rodzaj cementu: CEM II/B-V 32,5 R
	c/w (Ω) = 1.0
Średnica dyszy (2 szt.)	d_{01} = 2,8 mm
	d_{02} = 4,0 mm
Ciśnienie iniekcji	p_{g1} = 180 (250) bar
	p_{g2} = 360 bar
Prędkość obrotowa żerdzi iniekcyjnej	ω_1 = 12 obr/min
	ω_2 = 25 obr/min
Wydatek powietrza (dla systemu podwójnego)	12 m^3/min.
Ciśnienie powietrza (dla systemu podwójnego)	p_a = *0.*7 MPa
Prędkość podnoszenia	V_S = 8.3·10^{-3} m/s
Skok	Δz = 40 mm

Tablica 5.2 Parametry iniekcji strumieniowej na poletku doświadczalnym w Bojszowach Nowych

System	Nr kolumny	Ciśnienie iniekcji p_g [bar]	Wydatek powietrza [m^3/min.]	Ciśnienie powietrza p_a [MPa]	Średnica dyszy d_0 [mm]	Prędkość obrotowa żerdzi ω [obr/min]
System pojedynczy	1S	360	-	-	4.0	25
	2S	360	-	-	2.8	25
	3S	180	-	-	4.0	25
	4S	250	-	-	2.8	25
	5S	360	-	-	4.0	12
	6S	360	-	-	2.8	12
	7S	180	-	-	4.0	12
	8S	250	-	-	2.8	12
System podwójny	1D	360	12	0.7	4.0	25
	2D	180	12	0.7	4.0	25
	3D	360	12	0.7	4.0	12
	4D	180	12	0.7	4.0	12
	5D	360	12	0.7	2.8	25
	6D	260	12	0.7	2.8	25
	7D	360	12	0.7	2.8	12
	8D	250	12	0.7	2.8	12

a) b)

Rys. 5.3 a) Wiertnica MDT Mc 180B podczas prób przed wykonywaniem kolumn na poletku doświadczalnym, b) widok na wykonane kolumny (zdj. własne)

6. CHARAKTERYSTYKA GEOMETRYCZNA KOLUMN INIEKCYJNYCH W BOJSZOWACH NOWYCH

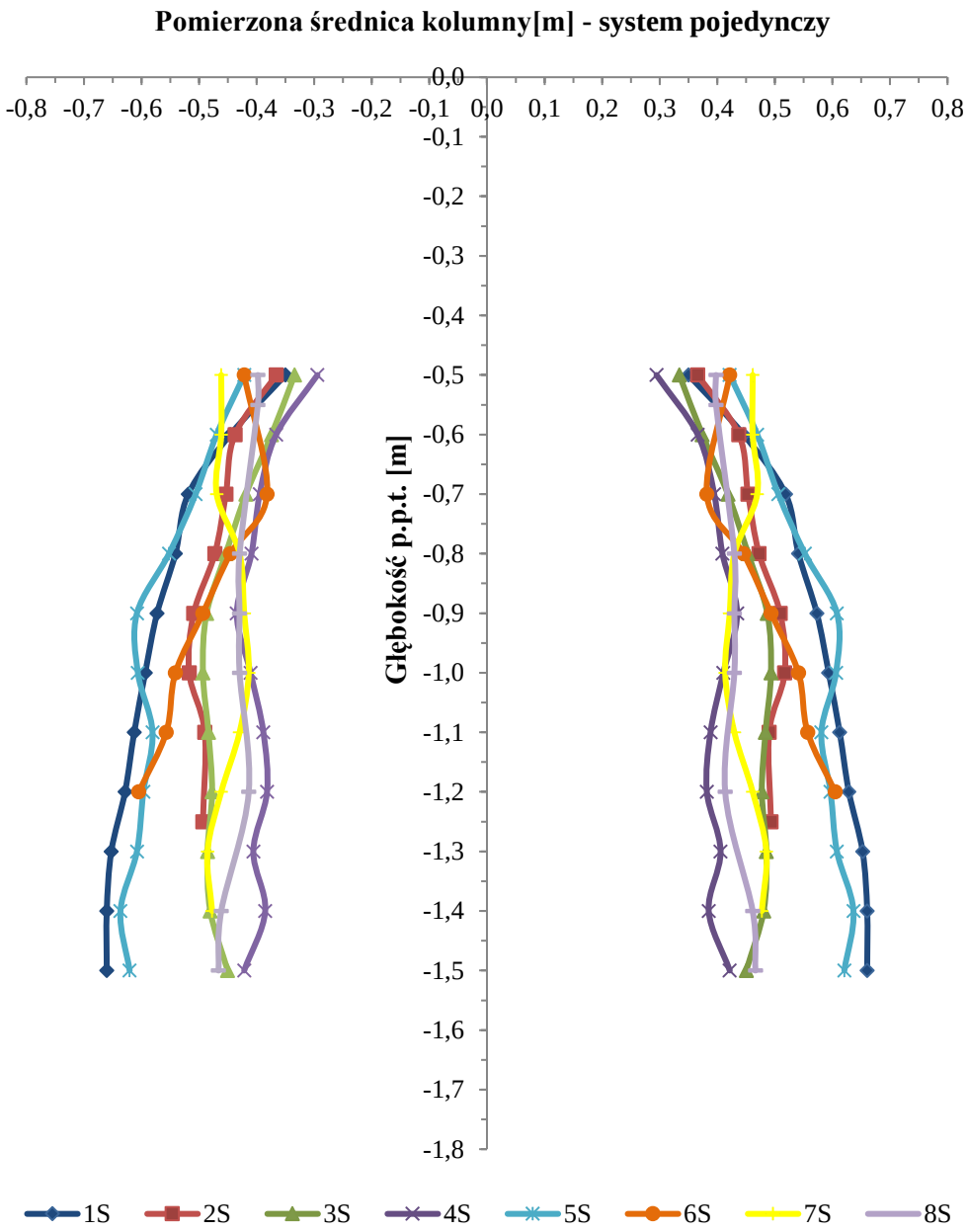
6.1 Pomiary odsłoniętych kolumn

W celu pomiaru średnic kolumn iniekcyjnych, jak również celem pobrania rdzeni do badań wytrzymałościowych, kolumny zostały odsłonięte do głębokości ok. 1,7 m p.p.t. Plan badań zakładał odsłonięcie kolumn do największej możliwej głębokości, jednak na poziomie ok. 1,7 m p.p.t. pojawiła się woda gruntowa, która uniemożliwiła dalsze odsłonięcie (rys. 6.1).

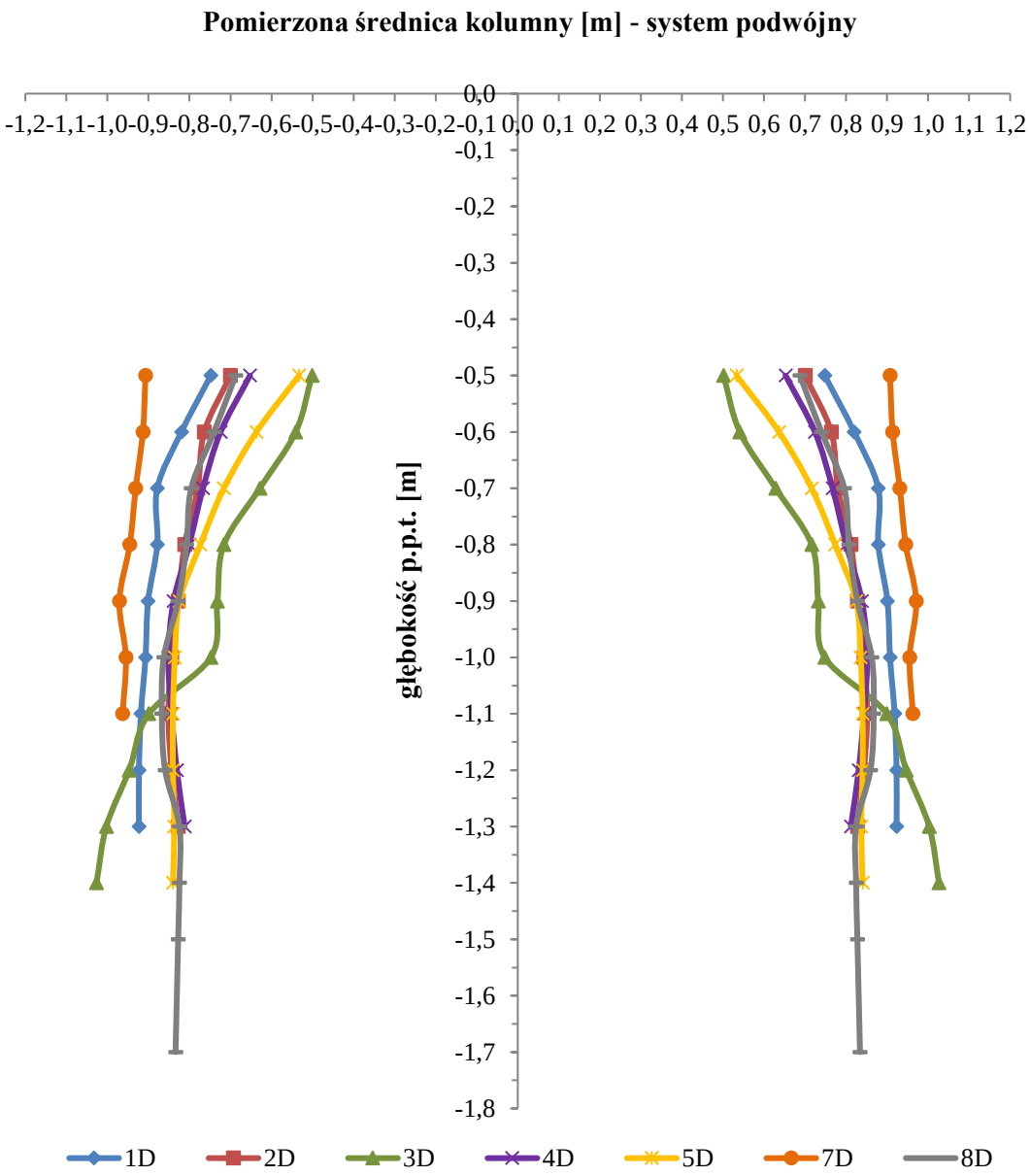
Następnie kolumny oczyszczono i pomierzono ich obwody w interwale co 10 cm. Wyniki pomiarów średnicy kolumn iniekcyjnych zostały przedstawione na rysunku 6.2 i 6.3. Na rysunku 6.4 przedstawiono odsłonięte kolumny iniekcyjne wykonane w systemie pojedynczym i podwójnym.

Po analizie wyników stwierdzono, iż na uzyskaną średnicę kolumn wpływ ma rodzaj systemu iniekcji, jak również energia kinetyczna strumienia iniektu przy dyszy iniekcyjnej E'_n (wzór 4.3) (rys. 6.5). Prędkość obrotowa żerdzi iniekcyjnej Ω ma pomijalny wpływ na uzyskane średnice kolumn.

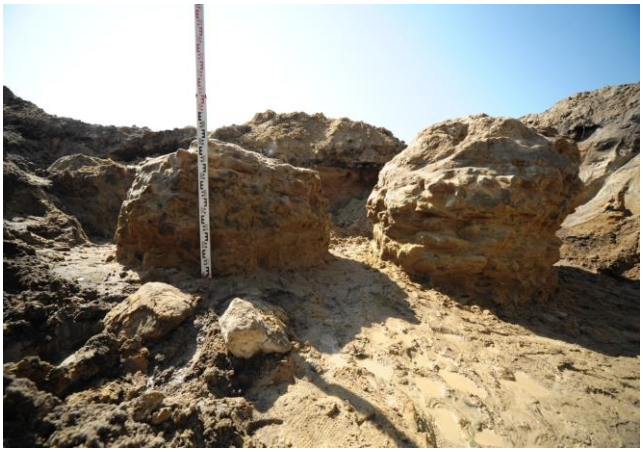
Rys. 6.1 Widok odsłoniętych kolumn iniekcyjnych (zdj. własne i J. Bzówki)



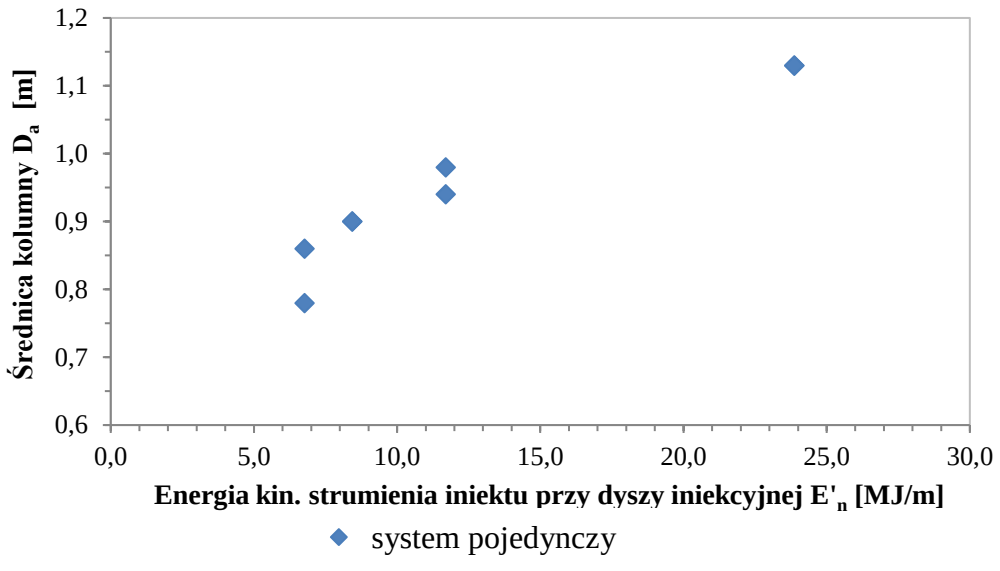
Rys. 6.2 Wyniki pomiarów średnicy kolumn wykonanych systemem pojedynczym



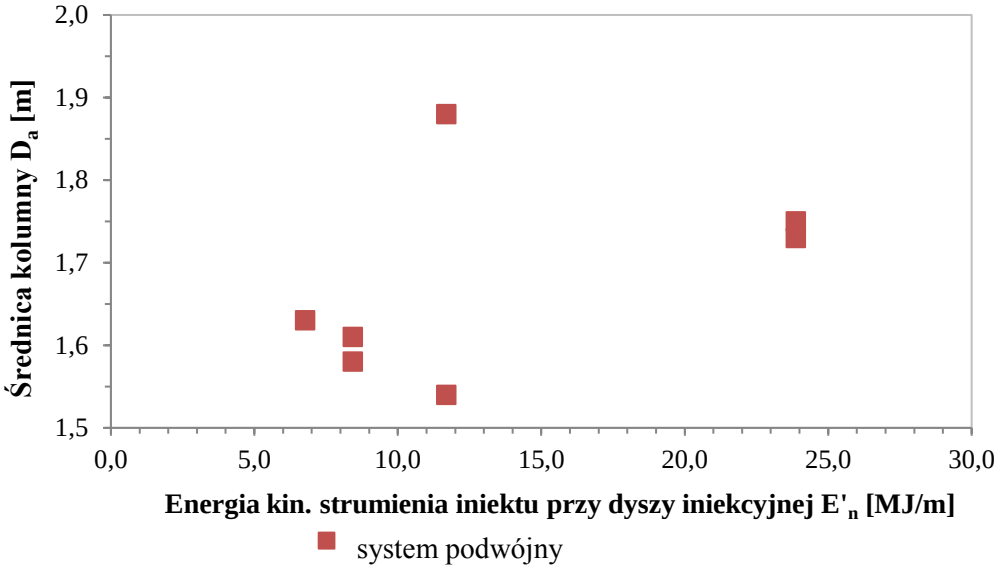
Rys. 6.3 Wyniki pomiarów średnicy kolumn wykonanych systemem podwójnym

a) b) 

Rys. 6.4 Pomiary odsłoniętych kolumn iniekcyjnych: a) kolumna 7S (zdj. wł.), b) kolumna 7D (zdj. A. Juzwa)



a)



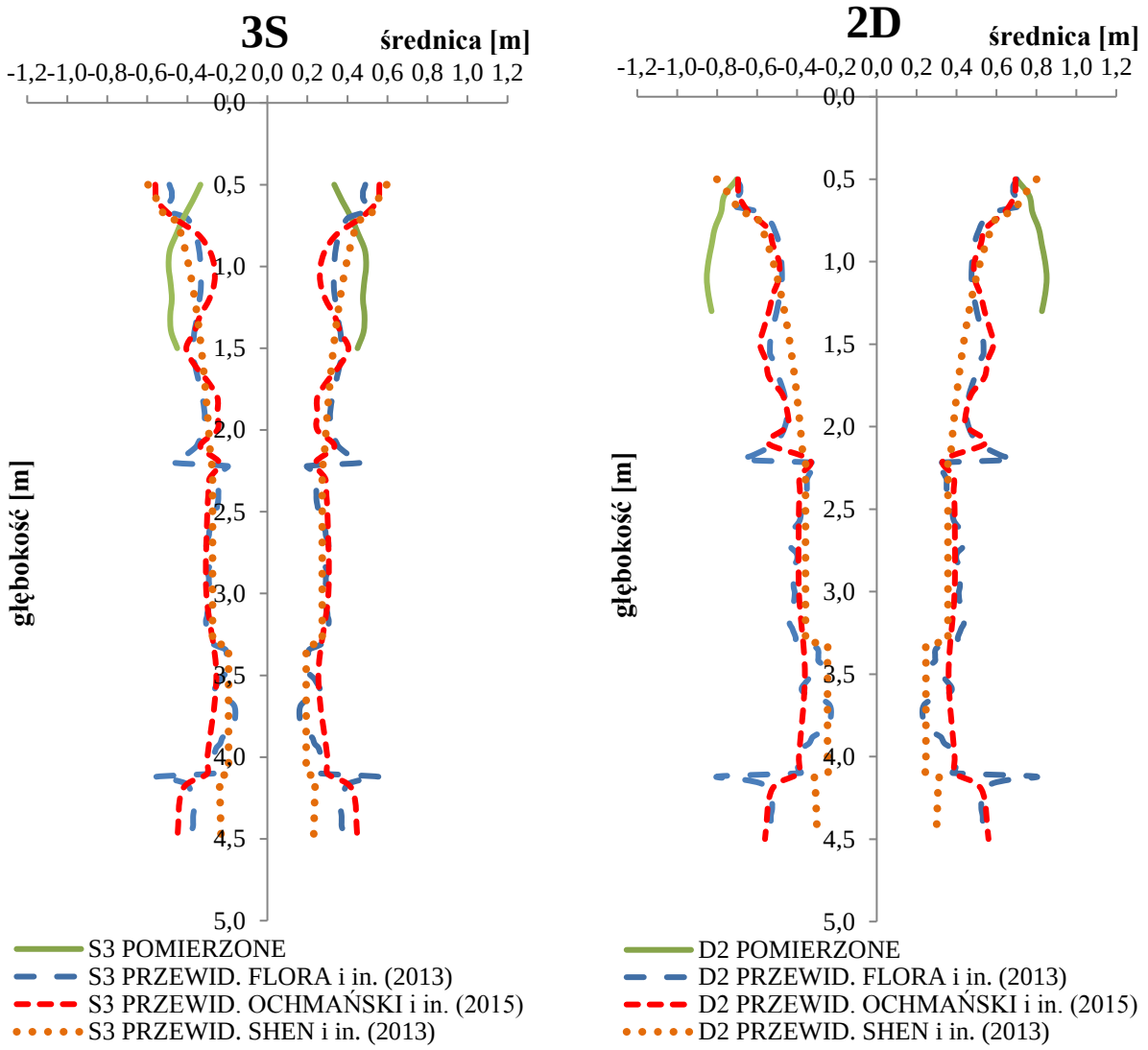
b)

Rys. 6.5 Pomierzone średnice kolumn iniekcyjnych w zależności od użytej energii kinetycznej strumienia iniektu przy dyszy iniekcyjnej E'_n dla: a) systemu pojedynczego, b) systemu podwójnego

6.2 Porównanie wyników pomiarów i przewidywań

Wyniki pomiarów średnicy kolumn iniekcyjnych zostały następnie porównane z obliczeniami analitycznymi wykonanymi na podstawie algorytmów metod przewidywania według Flory i in. (2013) oraz Shena i in. (2013). Wyniki porównano również z wykresami Ochmańskiego i in. (2015), stworzonymi na podstawie sztucznych sieci neuronowych.

We wszystkich analizowanych metodach (zarówno dla systemu pojedynczego i podwójnego) stwierdzono niedoszacowanie przewidywanych średnic kolumn w stosunku do wartości rzeczywistych (rys. 6.6). W celu ulepszenia powyższych metod, Autorka zaproponowała nowe wartości współczynników wykorzystywanych w obliczaniu przewidywanych średnic kolumn. Zostało to szczegółowo opisane w pracy doktorskiej.



Rys. 6.6 Przykładowe porównanie wyników pomiaru średnic kolumn iniekcyjnych z wartościami uzyskanymi za pomocą opisanych metod przewidywania średnic kolumn

7. CHARAKTERYSTYKA MECHANICZNA KOLUMN INEKCYJNYCH W BOJSZOWACH NOWYCH

W celu wykonania charakterystyki mechanicznej tworzywa gruntowo-cementowego, wykonano badania wytrzymałościowe materiału kolumn pochodzących z kolumn próbnych (wytrzymałość na jednoosiowe i trójosiowe ściskanie) oraz urobku (wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie).

W tablicy 7.1 przedstawiono sumaryczne wyniki wytrzymałości materiału kolumn i urobku pobranego podczas wykonywania kolumn na jednoosiowe ściskanie. W celu możliwości porównania między sobą wyników, uzyskane wartości wytrzymałości sprowadzono do średniej wytrzymałości materiału po 28 dniach dojrzewania (q^*_{um}). Ze względu na brak wytycznych, co do analizy i interpretacji wyników badań wytrzymałościowych tworzywa gruntowo-cementowego, obliczenia przeprowadzono jak dla

betonu zgodnie z normami [N2, N4-N7] i Jasińskim (2014). Należy nadmienić, że ze względu na dużą niejednorodność materiału, uzyskane wyniki cechują się współczynnikiem zmienności na poziomie 30% (w przypadku urobku) i 30÷70% w przypadku materiału kolumn. Należy to uznać za normalne, ponieważ wartości wytrzymałość tworzywa gruntowo-cementowego charakteryzują się takimi rozrzutami (patrz rozdz. 4.2).

Tablica 7.1 Zestawienie wyników wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (po 28 dniach) próbek wykonanych z rdzeni kolumn i urobku pobranego podczas wykonywania kolumn

Rodzaj próbek	**System pojedynczy**		**System podwójny**	
	Liczba próbek [-]	q^*_{umSF} **[MPa]**	**Liczba próbek [-]**	q^*_{umDF} **[MPa]**
1. Urobek (próbki sześcienne: 150x150x150 mm)	24	**4,9**	10	**2,0**
2a. Rdzenie kolumny Prędkość obciążenia 1 kN/s (próbki walcowe, h/d=2,0, h=200 mm, d=100 mm)	14	7,0/1,22=5,7 5,7*1,25=**7,1**	-	-
2b. Rdzenie kolumny Prędkość obciążenia 2 kN/s (próbki walcowe, h/d=2,0, h=200 mm, d=100 mm)	19	11,8/1.22=9,7 9,7*1,25=**12,1**	8	1,1/1,22=0,9 0.9*1,25=**1,1**
2c. Rdzenie kolumny Prędkość obciążenia 2 kN/s (próbki walcowe, h/d=1,0, h=100 mm, d=100 mm)	27	11,2/1,22=**9,2**	19	2,8/1,22=**2,3**

gdzie:

q^*_{umSF} - średnia wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie po 28 dniach dojrzewania tworzywa gruntowo-cementowego systemu pojedynczego iniekcji strumieniowej,

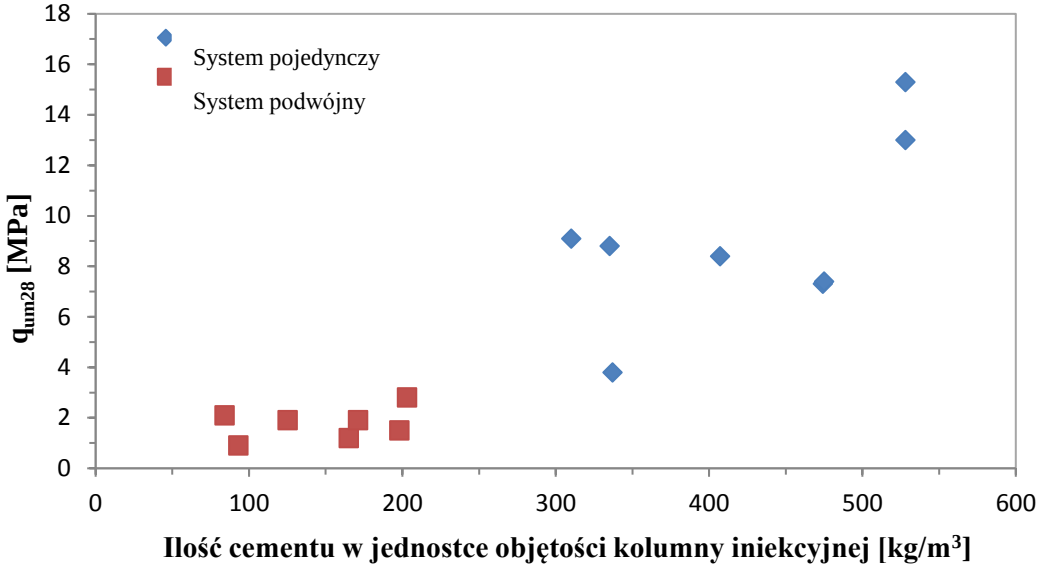
q^*_{umDF} - średnia wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie po 28 dniach dojrzewania tworzywa gruntowo-cementowego systemu podwójnego iniekcji strumieniowej.

Wyniki badań tworzywa gruntowo-cementowego w aparacie trójosiowego ściskania przedstawiono w tablicy 7.2.

Tablica 7.2 Zestawienie wyników badań w aparacie trójosiowego ściskania tworzywa gruntowo-cementowego

Rodzaj systemu iniekcji	**Wytrzymałość graniczna $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ [MPa]**	**Moduł Younga E [GPa]**	**Współ. Poissona ν [-]**	**Kąt tarcia wewn. ϕ [°]**	**Spójność c [MPa]**	**Błąd stand. kąta tarcia wewn. ϕ S_ϕ [°]**	**Błąd stand. spójności c S_c [MPa]**
System pojedynczy	20,0	4,6	0,17	50,44	1,22	4,58	0,89
System podwójny	8,4	1,1	0,19	41,51	0,82	6,12	0,91

Po analizie zgromadzonych danych doświadczalnych stwierdzono, iż jednym z powodów wyższej wartości wytrzymałości tworzywa gruntowo-cementowego materiału kolumn wykonanych systemem pojedynczym (w stosunku do systemu podwójnego) jest większa ilość cementu zawarta w jednostce objętości kolumny iniekcyjnej [kg/m^3] (rys. 7.1). Zostało to potwierdzone również badaniami składu mineralogicznego tworzywa gruntowo-cementowego (wykonano badania dyfrakcji rentgenowskiej, analizy termicznej, termograwimetrii oraz wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowe), które szczegółowo przedstawiono i opisano w pracy doktorskiej.



Rys. 7.1 Średnia wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie tworzywa gruntowo-cementowego (po 28 dniach dojrzewania) w funkcji ilości cementu na jednostkę objętości kolumny iniekcyjnej

8. PODSUMOWANIE

8.1 Wnioski

Celem pracy doktorskiej było głębsze zrozumienie procesu iniekcyjnego i jego wpływu na geometryczne i mechaniczne właściwości materiału kolumn iniekcyjnych. W tym celu, w pierwszej kolejności wykonano analizę danych literaturowych, a następnie stworzono modele numeryczne pozwalające odtworzyć turbulentny charakter przepływu iniektu. Narzędzie numeryczne potwierdziło, że im wyższa energia kinetyczna iniekcji (w praktyce inżynierskiej modyfikowana przez ciśnienie iniekcji p_0 i średnicę dysz d_0), tym większy zasięg oddziaływania iniektu. Pozytywny wpływ na strefę oddziaływania ma również wprowadzenie dodatkowego medium - powietrza, jak w przypadku systemu podwójnego.

Badania terenowe na poletku doświadczalnym potwierdziły, iż kolumny wykonywane systemem podwójnym charakteryzują się większymi uzyskiwanymi średnicami, ale jednocześnie mniejszymi wartościami wytrzymałości materiału gruntowo-cementowego. Badania składu mineralogicznego wykazały, iż większe ilości cementu (odpowiedzialnego za wytrzymałość) znajdują się w materiale kolumn wykonanych systemem pojedynczym.

8.2 Rekomendacje do dalszych badań

Z racji, iż nie badano materiału kolumn formowanych w glinach zawierających części organiczne (materiał był za słaby, żeby pobrać próbki do badań) dalsze badania terenowe należałoby prowadzić w gruntach spoistych.

Jeżeli chodzi o charakterystykę wytrzymałościową materiału kolumn, bardzo cenną informacją byłoby zbadanie wytrzymałości materiału kolumn pochodzącego z różnych miejsc w obrębie średnicy kolumny (ze środka, z połowy promienia oraz ze skraju kolumny).

Duża liczba danych eksperymentalnych pozwoliłaby ulepszyć metody prognozowania średnic kolumn iniekcyjnych, zoptymalizować proces iniekcji strumieniowej poprzez wdrożenie bardziej realistycznych i ergonomicznych metod projektowania kolumn iniekcyjnych.

BIBLIOGRAFIA

[1] Bell A.L. (1993). Jet grouting (Chapter 7 in Ground improvement), edited by Moseley M.P, Blackie Academic & Professional, An Imprint of Chapman & Hall, s. 149-174.

[2] Bzówka J. (2009). Współpraca kolumn wykonywanych techniką iniekcji strumieniowej z podłożem gruntowym. Monografia. Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa, Katedra Geotechniki, Gliwice.

[3] Chu E. H. (2005). Turbulent fluid jet excavation in cohesive soil with particular application to jet grouting. Praca doktorska. Uniwersytet w Massachusetts, USA.

[4] Croce P., Flora A.(2000). Analysis of single-fluid jet grouting. Geotechnique, Vol. 50, No. 6, s.739-748.

[5] Croce P., Flora A., Modoni G. (2014). Jet Grouting: Technology. Design and Control. Taylor & Francis Group, Londyn, Wielka Brytania.

[6] de Vleeschauwer P., Maertens J. (2000). Jet grouting: state of art in Belgium. Proceedings of the conference "Grouting – Soil improvement – Geosystems including reinforcement", s. 145-156.

[7] Di Natale, M., Greco, R. (2000). Misure di velocità in un getto sommerso ad asse verticale mediante la tecnica PIV. Seconda Università di Napoli.

[8] Flora A., Modoni G., Lirer S., Croce P. (2013). The diameter of single, double and triple fluid jet grouting columns: prediction method and field trial results. Géotechnique 63 (11), s. 934-945.

[9] Geostandard (2012). Dokumentacja geotechniczna określająca warunki gruntowo-wodne na poletku doświadczalnym w Bojszowach Nowych.

[10] Gökalp A., Düzceer R., (2002). Ground Improvement by jet grouting technique for foundations of a natural gas combined cycle power plant in Turkey. Ninth International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations, DFI, Nicea, Francja.

[11] Gwizdała K., Koscik P. (2005). Zastosowanie iniekcji strumieniowej do wzmacniania posadowień istniejących obiektów budowlanych. International Workshop city of tomorrow and cultural heritage – Pomerania outlook, Gdańsk.

[12] Heng J. (2008). Physical modelling of jet grouting process. Praca doktorska. Uniwersytet w Cambridge, Anglia, Wielka Brytania.

[13] Jarominiak A. (2000). Lekkie konstrukcje oporowe. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.

[14] Jasiński R. (2014). Określenie wytrzymałości betonu w konstrukcji. XXIX WPPK, Szczyrk, s. 1-110.

[15] Meinhard K. (2012). TEMPJET: Continuous Quality Control and Quality Assurance. Thermal modelling software to determine the diameter of jet-grouted columns. World of PORR, Vol. 160/2012, s.1-5.

[16] Modoni. G., Croce. P., Mongiovì. L. (2006). Theoretical modelling of jet grouting. Géotechnique 56 (5), s. 335–347.

[17] Modoni G., Wanik L., Giovinco G., Bzówka J., Leopardi A. (2016). Numerical analysis of submerged flows for jet grouting. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, Vol. 169 Iss. 1, s. 42-53.

[18] Ochmański M., Modoni G.. Bzówka J. (2015). Prediction of the diameter of jet grouting columns with artifical neural networks. Soils and Foundations 2015; 55(2), s. 425-436.

[19] Shen, S., Wang, Z., Yang, J., Ho, C. (2013). Generalized Approach for Prediction of Jet Grout Column Diameter. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, Issue 12, s. 2060-2069.

[20] Stark T., Axtell P., Lewis J., Dillon J., Empson W., Topi J., Walberg J. (2009). Soil inclusions in jet grouting columns. DFI Journal Vol. 3 No. 1, s. 33-44.

[21] Topolnicki M. (2011). Podchwytywanie i podnoszenie obiektów budowlanych za pomocą kontrolowanych iniekcji geotechnicznych. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna "Awarie Budowlane", Międzyzdroje 24-27.5.2011, Tom 1, s. 175-200.

[22] Toraldo C. (2016). Reliable definition of the characteristic strength of cement-treated soils by random field theory. Praca doktorska. Uniwersytet Cassino i Południowego Lazio, Cassino, Włochy.

[23] Wanik L., Bzówka J. (2012). Wpływ wybranych czynników na geometrię kolumn iniekcyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, tom z. 59, nr 3/IV, s. 117-124.

[24] Wanik K. (2010). Wybrane uwarunkowania projektowe i technologiczne stosowania iniekcji strumieniowej. Inżynieria i Budownictwo. nr. 2/2010, s. 68-70.

[25] Wanik K. (2013). Use of jet grouting technique to realize substructures of historic buildings. The example of an apartment building in Warsaw. 2nd International Symposium on Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites, Neapol, Włochy, s. 769-777.

[26] Wanik L., Modoni G. (2012). Numerical analysis of the diffusion of submerged jet for jet grouting application. Incontro Annuale dei Recercatori di Geotecnica (IARG), Padwa, 2-4 lipiec, artykuł 3.B.8.

[27] Wang Z., Shen S., Yang J. (2012). Estimation of the Diameter of Jet-Grouted Column Based on Turbulent Kinematic Flow Theory. Grouting and Deep Mixing, Geotechnical Special Publication No. 228, L. F. Johnsen, D.A. Bruce, and M. J. Byle, eds., Vol. 2, ASCE, Reston, Va., 2044-2051.

Normy:

[N1] BS EN 12716:2001. Execution of special geotechnical works- Jet grouting.

[N2] PN-B-03264:2002+Ap1:2004 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.

[N3] PN-EN 12716. Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Iniekcja strumieniowa.

[N4] PN-EN 12390-3:2002. Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.

[N5] PN-EN 13791:2008P. Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych.

[N6] PN-B-03264:2002+Ap1:2004 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne iprojektowanie.

[N7] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurocod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-Reguły ogólne I reguły dla budynków.