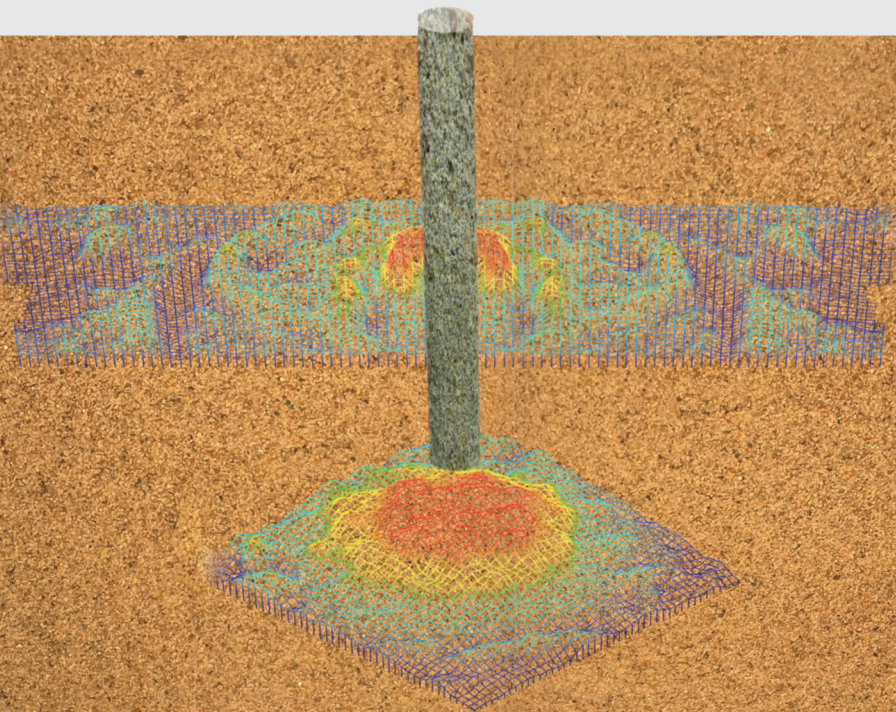




Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

Krzysztof Żarkiewicz

**Określenie mechanizmów
formowania się
oporu poboczniczy
i podstawy pala
podczas obciążenia
statycznego**



Krzysztof Żarkiewicz

**Określenie mechanizmów
formowania się
oporu pobocznic
i podstawy pala
podczas obciążenia
statycznego**

Szczecin 2023

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała

dr hab. inż. Grzegorz Kacprzak

Opracowanie redakcyjne

Wojciech Markowski

Wydano za zgodą Rektora Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego w Szczecinie

ISBN 978-83-7663-363-3

Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego
w Szczecinie

70-311 Szczecin, al. Piastów 48

tel. 91 449 47 60, e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl

Druk PPH „Zapol” Sobczyk Sp.j., al. Piastów 42, 72-062 Szczecin

Spis treści

Symbole i oznaczenia	5
1. Wstęp	7
2. Cel i zakres pracy	11
3. Współpraca pala z gruntem	13
3.1. Ogólny opis przekazywania obciążenia z pala do podłoża gruntowego	13
3.2. Opór poboczniczy pala.....	16
3.3. Opór podstawy pala.....	21
3.4. Zależność obciążenie–osiadanie głowicy pala	22
4. Eksperymentalne badania laboratoryjne próbných obciążeń statycznych pali.....	25
4.1. Badanie rozkładu oporów na pobocznice i podstawę pali z wykorzystaniem przetworników siły	25
4.2. Badania zmian naprężenia w gruncie wokół pala przy wykorzystaniu dotykowych, elastycznych map rozkładu naprężenia.....	31
4.3. Badania przemieszczeń gruntu przy wciskaniu pala z wykorzystaniem reperów pomiarowych.....	49
4.4. Fotogrametryczne badania przemieszczeń gruntu wokół pala	54
5. Zastosowanie praktyczne otrzymanych wyników badań	57
5.1. Badania terenowe próbných obciążeń statycznych pali	57
5.2. Badania pali drukowanych w technologii druku 3D	60
6. Podsumowanie.....	63
7. Literatura	65
Streszczenie	71
Abstract	72

Symbole i oznaczenia

A_b	–	pole powierzchni podstawy pala [m ²]
A_s	–	pole powierzchni poboczniczy pala [m ²]
D	–	średnica pala [m]
D_p	–	średnica strefy gruntu uplastycznionego pod podstawą pala [m]
G	–	moduł Kirchhoffa [kPa]
H	–	długość lub zagłębienie pala w gruncie [m]
N_1	–	opór podstawy pala [kN]
$N_{1,gr}$	–	graniczny opór podstawy pala [kN]
N_2	–	siła osiowa wciskająca przyłożona w głowicy pala [kN]
$N_{2,gr}$	–	graniczne obciążenia osiowe pala [kN]
s	–	osiadanie głowicy pala [mm]
T	–	opór poboczniczy pala [kN]
T_{∞}	–	graniczny opór poboczniczy pala [kN]
σ_1	–	jednostkowy opór pod podstawą pala, składowa pionowa naprężenia pod podstawą pala [kPa]
γ	–	odkształcenie postaciowe gruntu [–]
τ	–	jednostkowy opór poboczniczy pala, składowa styczna naprężenia na poboczniczy pala [kPa]

1. Wstęp

Fundamenty palowe są powszechnie stosowane w przypadku niewystarczającej wytrzymałości gruntu. Technologia ta umożliwia przenoszenie obciążeń z konstrukcji na głębsze warstwy gruntu o większej wytrzymałości i sztywności. Nawet w przypadku jednorodnego podłoża gruntowego wytrzymałość wzrasta wraz z głębokością z powodu większych naprężeń w gruncie (Salgado i in., 2000). Istnieje wiele różnych technologii fundamentów palowych, lecz wszystkie z nich łączy sposób przenoszenia obciążenia przez opór pobocznicy i podstawy pała. Opory te mobilizują się wraz z osiadaniem aż do wartości granicznej, przy której występuje znaczne i niekontrolowane osiadanie pała (Viggiani i in., 2011; Wrana, 2015; Meyer i Stachecki, 2018; Żarkiewicz, 2019c; Siemaszko i Meyer, 2021). Szczegółowy opis technologii fundamentów palowych, badań i metod określania nośności przedstawił Gwizdała (2010).

Badanie statycznego obciążenia pała dostarcza kluczowych informacji na temat jego interakcji z gruntem (Nasr i in., 2022; Huynh i in., 2022). Wyniki tego badania są często wykorzystywane do rozwoju metod obliczeniowych (Abd Elsamee, 2013; Jesswein i Liu, 2022a, 2022b), w tym również z zastosowaniem modeli matematycznych zależności obciążenie–osiadanie pała (Meyer i Kowalów, 2010; Abd Elsamee, 2012; Lastiasih i Sidi, 2014; Arham i in., 2017; Siemaszko i Meyer, 2019; Chen i in., 2022; Toth i in., 2022). Ponadto w badaniu tym coraz częściej używane są dodatkowe instrumenty pomiarowe, jak: strunowe czujniki odkształceń, tensometry oporowe, ekstensometry, czujniki światłowodowe i przetworniki siły, które mają za zadanie zmierzenie rozkładu oporów na pobocznice i podstawę pała (Glisic i in., 2002; Han i in., 2018; Siénko i in., 2019; Monsberger i in., 2020; Cui i in., 2021; Buda-Ożóg i in., 2022). Wyniki próbnego obciążenia statycznego mogą być podstawą dalszej interpretacji krzywej osiadania obciążenia pała z uwzględnieniem oporu pobocznicy

(Siemaszko i Meyer, 2021; Toth i in., 2022). Polska norma dotycząca statycznych badań nośności pali poprzez ściskanie osiowe (PN-EN ISO 22477-1, 2019) również zaleca zbadanie rozkładu siły osiowej w trzonie pala w celu określenia zmobilizowanego oporu jego poboczniczy i podstawy.

Niektóre zjawiska zaobserwowane w badaniach terenowych mogą być trudne do interpretacji ze względu na wiele niewiadomych, jak: poprawność zbadanych parametrów gruntu, uwarstwienie podłoża, zmienna geometria pala i różnorodność warunków wodnych. Z tego powodu niezbędne jest zmniejszenie liczby nieznanymi parametrów i wyodrębnienie tych danych w testach laboratoryjnych (Sales i in., 2017; Wang i in., 2020).

Osiowe obciążenie pala powoduje zmianę naprężeń i deformację podłoża gruntowego. Analiza naprężeń i odkształceń ma zasadnicze znaczenie dla opisanie właściwej interakcji pala z gruntem (Dijkstra i in., 2006). Opór poboczniczy i podstawy pala przyczynia się do powstania ugięcia przestrzeni gruntowej (Dembicki i in., 1988). Mobilizacja oporu poboczniczy pala związana jest z deformacją gruntu i skutkuje powstaniem w nim dodatkowego naprężenia (Żarkiewicz, 2019a; Ma i in., 2021). Opór poboczniczy pala mobilizuje się, a naprężenia w gruncie rosną, aż osiągnie on maksymalne wartości (Bolton, 1986; Hsu i in., 2014). Wzrost naprężeń jest spowodowany zachowaniem ścinanego gruntu (Shirato i in., 2006; Lashkari, 2012; Peng i in., 2014; Kim i in., 2020). Znajomość zmiany stanu naprężenia w gruncie jest również pomocna przy analizie efektu instalacji pali (Dijkstra i in., 2009; Dijkstra i Broere, 2010). Analiza ta, wspomagana podejściem numerycznym (Engin, 2013; Nakagama i in., 2022; Zhang i in., 2021), wskazuje, że zarówno zagęszczenie, jak i stan naprężenia zmieniają się w procesie instalacji pala (Mo i in., 2021).

W badaniach laboratoryjnych można zastosować wiele dodatkowych czujników pozwalających na pomiar stanu naprężenia i odkształcenia w gruncie (Jardine i in., 2009). Wykorzystanie czujnika dotykowego do pomiaru naprężeń

w gruncie podczas badania obciążenia pała przedstawili Żarkiewicz i Qatrameez (2021). Badanie zmian naprężenia w gruncie za pomocą dotykowego czujnika było również tematem pracy El-Sekelly i in. (2015). System rejestracji rozkładu naprężenia może być wykorzystany do określenia wzajemnego wpływu pali w grupie palowej (You i Chen, 2018). Kolejnym przykładem są badania w wiórkach geotechnicznych mających na celu odwzorowanie geostatycznego stanu naprężenia w gruncie (de Sanctis i in., 2021).

Mapy naprężenia i promieniowego przemieszczenia gruntu w pobliżu końcówki penetrometru przedstawili Ganju i in. (2020), którzy analizowali wpływ kruszenia cząstek na rozwój oporu penetrometru. Dodatkowe wyposażenie, takie jak czujniki dotykowe, umożliwia pomiar naprężenia w gruncie w celu opisanie mechanizmu przenoszenia obciążenia z pała na otaczający grunt. Zagadnienie zastosowania czujników dotykowych do pomiaru naprężeń w gruncie było poruszane przez wielu autorów (Tessari i in., 2010; Gao i Wang, 2013; Chan i in., 2019; Żarkiewicz i Qatrameez, 2021).

2. Cel i zakres pracy

Zagadnienia przedstawione we wstępie stanowiły inspirację do podjęcia badań dotyczących interakcji pala z gruntem, a w szczególności formowania się oporu pobocznicy i podstawy wraz z osiadaniem. Opór pobocznicy formowany wraz z osiadaniem był przedmiotem badań opisanych w rozprawie doktorskiej (Żarkiewicz, 2017). Zaobserwowano wówczas, że zjawisko formowania się oporu pobocznicy pala jest zagadnieniem złożonym, a ponadto zależnym od oporu podstawy. Do kompleksowego opisu mechanizmu współpracy pala z gruntem niezbędne jest analizowanie oporu pobocznicy i podstawy jednocześnie, jak również określenie zachowania się podłoża gruntowego przy wciskaniu pala. W związku z tym w programie badań prowadzonych po uzyskaniu stopnia naukowego doktora zaplanowano wykonanie stanowisk laboratoryjnych umożliwiających przeprowadzenie badań statycznych z dodatkowym oprzyrządowaniem zarówno pala, jak i ośrodka gruntowego.

Celem niniejszej pracy jest określenie mechanizmów formowania się oporu pobocznicy i podstawy pala wraz z osiadaniem na podstawie eksperymentalnych badań obciążeń statycznych w warunkach laboratoryjnych.

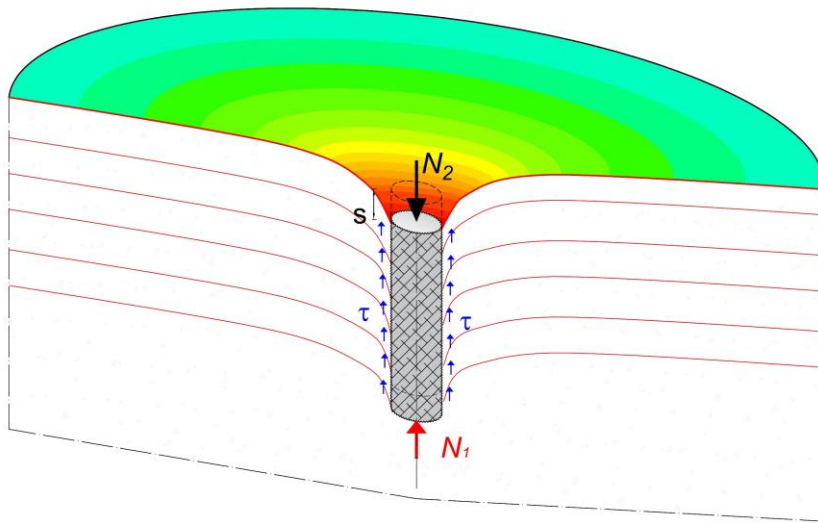
Zakres pracy obejmował:

- badania rozkładu oporów na pobocznice i podstawę pali o różnej geometrii i powierzchni pobocznicy z wykorzystaniem przetworników siły,
- badania zmian naprężenia w gruncie wokół pala przy użyciu dotykowych elastycznych map rozkładu naprężenia,
- badania przemieszczeń gruntu przy wciskaniu pala z zastosowaniem reparów pomiarowych,
- fotogrametryczne badania przemieszczeń gruntu wokół pala.

3. Współpraca pala z gruntem

3.1. Ogólny opis przekazywania obciążenia z pala do podłoża gruntowego

Pal przekazuje obciążenie osiowe przyłożone w głowicy do podłoża gruntowego w wyniku występowania oporu pobocznicy i podstawy. Wciskanie pala powoduje jego osiadanie i ugięcie przestrzeni gruntowej (rys. 1). Ugięcie to może być opisane podstawowym prawem Kirchhoffa, w którym naprężenia styczne w gruncie są iloczynem modułu odkształcenia postaciowego i bezwymiarowego odkształcenia postaciowego gruntu (1).



Rys. 1. Schemat ugięcia przestrzeni gruntowej i formowania się oporów pobocznicy i podstawy pala spowodowanych jego osiowym wciskaniem

$$\tau = \gamma G \quad (1)$$

Do szczegółowej analizy współpracy pala z gruntem potrzebny jest opis matematyczny krzywej jego osiadania. Funkcję zależności obciążenie–osiadanie pala zaproponowali Meyer i Kowalów (Meyer i Kowalów, 2010; Meyer, 2014).

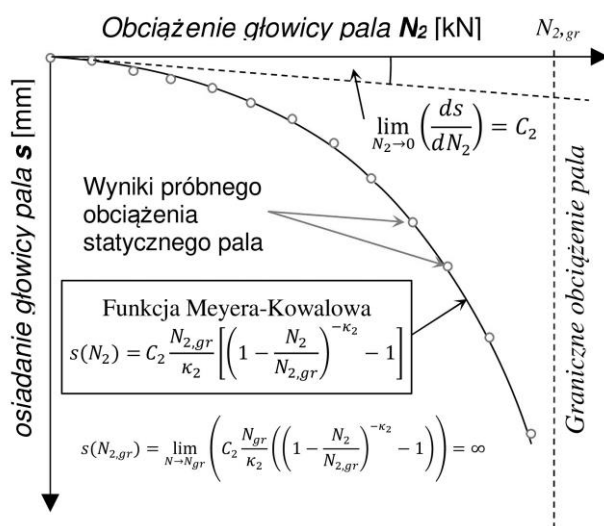
$$s = C_2 N_{2,gr} \frac{\left(1 - \frac{N_2}{N_{2,gr}}\right)^{-\kappa_2} - 1}{\kappa_2} \quad (2)$$

gdzie:

C_2 – współczynnik kierunkowy asymptoty ukośnej przechodzącej przez początek układu współrzędnych $N_2 - s$ [mm/kN],

κ_2 – bezwymiarowy parametr krzywej osiadania pała.

Zaproponowana funkcja opisuje zależność obciążenie–osiadanie pała za pomocą trzech parametrów. Parametr C_2 określa początkową sztywność pała w gruncie i może być utożsamiany z odwrotnością współczynnika Winklera. Współczynnik ten zależy przede wszystkim od średnicy pała i modułu odkształcenia gruntu, ale jest także zależny od rozdziału oporu na pobocznice i podstawę pała (Meyer i Żarkiewicz, 2014; Meyer i Szmechel, 2018; Siemaszko i Meyer, 2019). Kolejnym parametrem jest $N_{2,gr}$, określający wartość obciążenia, przy którym pał osiada w sposób niekontrolowany i niemożliwe jest zwiększenie statycznego obciążenia z uwagi na osiągnięcie maksymalnych oporów. W matematycznym ujęciu $N_{2,gr}$ wyznacza asymptotę pionową określoną przez siłę, przy której osiadanie dąży do nieskończoności. Przykładową krzywą aproksymującą M-K na tle wyników próbnego obciążenia statycznego pała przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Funkcja Meyera–Kowalowa opisująca zależność obciążenie–osiadanie pała

Przyłożone obciążenie jest zawsze równoważone przez sumę oporów pobocznic i podstawy pała (3).

$$N_2 = N_1 + T \quad (3)$$

gdzie:

N_1 – osiowa siła wypadkowa reprezentująca naprężenia σ_1 w podstawie pała [kN],

T – osiowa siła wypadkowa reprezentująca naprężenia τ na pobocznic pała [kN].

W przypadku gdy opór gruntu nie równoważy siły przyłożonej w głowicy pała, mówi się o osiągnięciu granicznej wartości $N_{2,gr}$. Przy tym obciążeniu pał osiada w sposób niekontrolowany i niemożliwe jest statyczne przyłożenie siły większej niż nośność graniczna pała. Wówczas równanie (3) otrzymuje postać (4):

$$N_{2,gr} = N_{1,gr} + T_{\infty} \quad (4)$$

gdzie:

$N_{1,gr}$ – graniczny opór podstawy pała [kN],

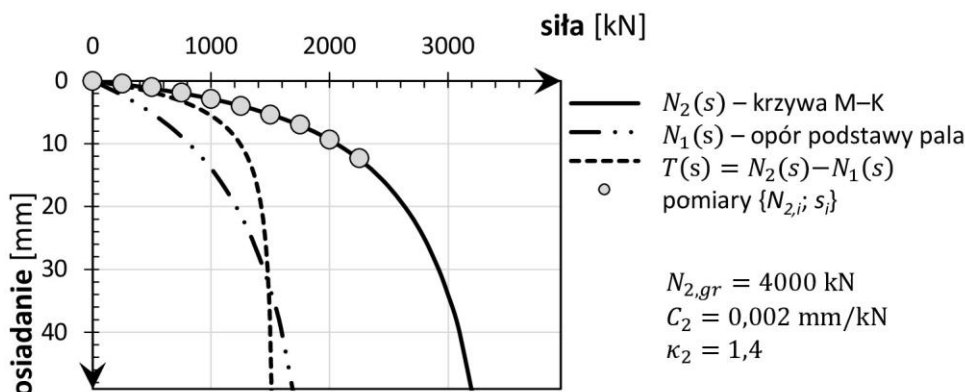
T_{∞} – graniczny opór pobocznic pała [kN].

Zwykle graniczny opór pała nie jest osiągany w warunkach eksploatacyjnych. Opory graniczne można uzyskać podczas próbnego obciążenia pała, gdy osiadanie charakteryzuje się dużym przyrostem w stosunku do poprzedniego stopnia obciążenia oraz brakiem stabilizacji osiadania w czasie. Znajomość granicznego oporu pała jest ważna przy określaniu zapasu bezpieczeństwa.

Oprócz wartości granicznych oporów ważna jest również ich mobilizacja wraz z osiadaniem głowicy pała. Dzięki znajomości zależności obciążenie–osiadanie można sprawdzić, jaka jest wartość osiadania przy projektowanym obciążeniu, ile wynoszą zmobilizowane opory pobocznic i podstawy pała, a także jaki jest zapas bezpieczeństwa w stosunku do nośności granicznej i dopuszczalnego osiadania.

Z uwagi na różny charakter mobilizacji oporu pobocznic i podstawy pała wraz z jego osiadaniem stopień wykorzystania tych oporów przy dopuszczal-

nych osiadaniach jest inny niż rozkład oporów w stanie granicznym. Jak przedstawiono na rys. 3, pomimo iż opór poboczniczy w stanie granicznym jest mniejszy niż opór podstawy pała, to przy osiadaniach równych 10 mm pobocznica przejmuje ponad 60% obciążenia przyłożonego w głowicy.



Rys. 3. Przykłady rozkładu krzywej osiadania na opór podstawy i poboczniczy

3.2. Opór poboczniczy pała

3.2.1. Graniczny opór poboczniczy pała

Graniczny opór poboczniczy pała występuje przy całkowitym poślizgu gruntu po poboczniczy pała. Poślizg ten może wystąpić jednocześnie na całej długości pała lub może być osiągnięty lokalnie, początkowo w kilku miejscach, aż do osiągnięcia poślizgu na całej długości pała. Osiągany jest przy dużych osiadaniach, kiedy zmobilizowane naprężenie styczne zgodnie z prawem Kirchhoffa osiąga wartość wynikającą z tarcia gruntu o pobocznice pała lub z maksymalnej wytrzymałości gruntu na ścinanie. Opór graniczny poboczniczy jest iloczynem jej powierzchni i średniej wartości składowej stycznej naprężenia przy poślizgu gruntu po niej, występującym na całej długości pała. Może być obliczony na podstawie informacji o warunkach tarcia gruntu o pobocznice zgodnie ze wzorami (5) i (6).

$$T_{\infty} = A_s \tau_{\infty} \quad (5)$$

gdzie:

A_s – opór pobocznicy pala, $A_s = \pi DH$ – pale o przekroju kołowym, $A_s = a^2$ – pale o przekroju kwadratowym (a – szerokość boku przekroju pala),

τ_{∞} – średnia wartość składowej stycznej naprężenia na pobocznicy pala przy poślizgu gruntu po pobocznicy pala [kPa].

$$\tau_{\infty} = \frac{1}{H} \sum \tau_{cv,i} h_i \quad (6)$$

gdzie:

h_i – rozpatrywany wycinek długości pala [m], $\sum h_i = H$,

$\tau_{cv,i}$ – składowa styczna naprężenia na pobocznicy pala przy poślizgu gruntu w rozpatrywanym wycinku długości pala [kPa].

Bardzo często jednostkowy opór pobocznicy pala τ_f obliczany jest na podstawie metody „beta”, wykorzystującej informację o naprężeniu efektywnym w gruncie i współczynniku tarcia gruntu o pobocznice (7).

$$\tau_f = \beta \sigma'_0 = K \tan \delta_k \sigma'_0 \quad (7)$$

gdzie:

σ'_0 – naprężenie efektywne w gruncie przy ścinaniu [kPa],

δ_k – kąt tarcia na styku gruntu i pobocznicy pala [°],

K – współczynnik parcia gruntu [–],

β – współczynniki zależne od rodzaju gruntu, zagęszczenia i stopnia skonsolidowania.

W tabeli 1 zamieszczono współczynniki β podane przez Felleniusa (2023).

Tabela 1. Przedziały współczynnika β przyjmowane do obliczeń oporu pobocznicy w zależności od rodzaju gruntu (Fellenius, 2023)

Rodzaj gruntu	β
ł	0,15–0,35
Pył	0,25–0,50
Piasek	0,30–0,90
Żwir	0,35–0,80

W podejściu tym iloczyn $K\sigma'_0$ jest składową poziomą naprężenia w gruncie przyłożoną prostopadle do powierzchni poboczniczy pala. Po przemnożeniu przez $\tan\delta_k$ otrzymuje się wartość jednostkowego tarcia. Zatem równanie (7) jest zgodne z warunkami prawa tarcia. Tarcie gruntu jest zależne od powierzchni jego działania – im większa powierzchnia poboczniczy, tym większa całkowita siła docisku gruntu.

O ile współczynnik tarcia gruntu o pobocznice może być wyznaczony na podstawie badań laboratoryjnych lub eksperymentalnych z dość dużą precyzją, o tyle poprawne oszacowanie składowej radialnej naprężenia w gruncie jest skomplikowanym zagadnieniem. Naprężenia radialne (poziome) w gruncie wokół pala są uzależnione od takich czynników, jak: uziarnienie gruntu, kąt tarcia wewnętrznego w gruncie, współczynnik prekonsolidacji gruntu, technologia wykonania pala, stopień konsolidacji gruntu. Te wszystkie informacje zawarte są we współczynniku β . Wraz z obciążaniem pala stan naprężenia w gruncie ulega zmianie.

Współczynnik β może być również obliczony jako iloczyn współczynnika parcia gruntu K i tarcia gruntu o pobocznice, wyrażony jako $\tan\delta_k$. Współczynnik tarcia gruntu o pobocznice $\tan\delta_k$ może zawierać się w przedziale od wartości 0,2 do wartości $\tan\varphi_k$, gdzie φ_k jest kątem tarcia gruntu otaczającego pal. Jest to zatem zakres 0,2 do 1,0. Współczynnik parcia gruntu K przyjmowany jest w zależności od stopnia prekonsolidacji gruntu i technologii wykonania pala w zakresie od 0,5 do nawet 2,0 (Lambe i Whitman, 1969; Loukidis i Salgado, 2008; Abdullah i Taha, 2013; Han i in., 2018).

W związku ze zmianą stanu naprężenia w gruncie w trakcie obciążenia, stan krytyczny, w którym występuje poślizg gruntu po poboczniczy, odnosi się również do zmienionych naprężeń radialnych. Zjawisko to może zostać uwzględnione po dodaniu do składowej radialnej wynikającej z naprężeń geostatycznych składowej $\Delta\sigma'_{rd}$, co łącznie daje informację o składowej normalnej

naprężenia przy osiągnięciu poślizgu gruntu po poboczniczy. Wówczas równanie (7) otrzymuje postać (8) (Barrett i Prendergast, 2020; Lehane i in., 2020).

$$\tau_f = \sigma'_{rf} \tan \delta_k \quad (8)$$

$$\sigma'_{rf} = \sigma'_{hs} + \Delta\sigma'_{rd} \quad (9)$$

gdzie:

σ'_{rf} – składowa radialna (pozioma) naprężenia w gruncie przy ścinaniu [kPa],

σ'_{hs} – składowa radialna (pozioma) naprężenia geostatycznego w gruncie [kPa],

$\Delta\sigma'_{rd}$ – wzrost składowej radialnej (poziomej) naprężenia w gruncie [kPa].

Na wzrost składowej radialnej w równaniu (9) wpływa efekt instalacji pala w gruncie oraz zmiana odkształcenia objętościowego przy ścinaniu gruntu. Ograniczenie dylatacji gruntu przy ścinaniu podczas obciążania pala prowadzi do wzrostu składowej radialnej (poziomej) naprężenia w otoczeniu poboczniczy pala $\Delta\sigma'_{rd}$. Wzrost ten został opisany przez teorię ekspansji równaniem (10) (Lehane i in., 2020):

$$\Delta\sigma'_{rd} = 4Gy/D \quad (10)$$

gdzie:

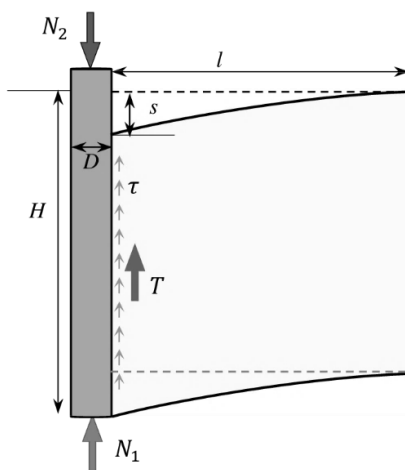
G – moduł odkształcenia postaciowego gruntu,

y – dylatacja gruntu.

3.2.2. Formowanie się oporu poboczniczy wraz z osiadaniem głowicy pala

Zagadnienie formowania się oporu poboczniczy wraz z osiadaniem jest wciąż aktualnym kierunkiem badań. Coraz częściej instrumenty stosowane w pomiarach próbnych obciążeń statycznych pozwalają na określenie oporu poboczniczy, jaki formuje się w każdym stopniu obciążenia (Krasiński i Sieńko, 2010; Żarkiewicz, 2012; Buda-Ożóg i in., 2022). Zdarza się, że opór ten nie jest zgodny ze spodziewanymi wartościami, wynikającymi z obliczeń, co świadczy o konieczności dalszego udoskonalania metod projektowych.

Mobilizacja oporu, jaki powstaje na pobocznicy pala, związana jest z ugięciem przestrzeni gruntowej (rys. 4). Grunt ściśle przylegający do pala przy wystarczającym tarcu przemieszcza się razem z nim. Opór, jaki powstaje przy osiadaniu, wynika z odkształcenia postaciowego gruntu wokół pala. Zjawisko to ma miejsce aż do osiągnięcia maksymalnego oporu pobocznicy występującego przy poślizgu gruntu po pobocznicy. Odkształcenie postaciowe gruntu wokół pala powoduje zmianę stanu naprężenia i jednocześnie zmienia warunki występowania poślizgu gruntu po pobocznicy.



Rys. 4. Schemat ugięcia przestrzeni gruntowej wokół pala

Naprężenia styczne, jakie tworzą się na pobocznicy pala, są związane z jego osiadaniem i można je opisać wzorem (11).

$$\tau = G \frac{s}{l} \quad (11)$$

gdzie:

τ – składowa styczna naprężenia na pobocznicy pala [kPa],

G – stała Kirchhoffa gruntu w otoczeniu pala [kPa],

l – zasięg poziomy deformacji gruntu [m].

3.3. Opór podstawy pala

3.3.1. Graniczny opór podstawy pala

Opór podstawy pala jest iloczynem naprężenia pod jego podstawą i powierzchnią podstawy zgodnie ze wzorem (12).

$$N_{1,gr} = \sigma_{1,gr} A_b \quad (12)$$

gdzie:

$\sigma_{1,gr}$ – graniczne naprężenie pod podstawą pala [kPa],

$A_b = \pi D^2/4$ – pole podstawy pala [m²].

Wśród metod umożliwiających określenie granicznych naprężeń pod podstawą pala można wyróżnić metodę opartą na wynikach sondowania CPT, gdzie opór podstawy pala jest obliczany wprost jako część oporu zmobilizowanego pod stożkiem sondy CPT ze wzoru (13).

$$\sigma_{1,gr} = \Psi \bar{q}_c \quad (13)$$

gdzie:

Ψ – współczynnik nośności podstawy pala [–],

$\bar{q}_c$ – uśredniony, przyjęty do obliczeń jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy CPT w strefie podstawy pala [kPa].

Według różnych podejść i zaleceń do obliczeń uśrednionego oporu gruntu $\bar{q}_c$ brane są pod uwagę wyniki sondowania w strefie od 4D poniżej do 8D powyżej podstawy pala. Wśród metod pośrednich można wyróżnić oparte na równaniu Terzagiego, w którym nośność podstawy określana jest jako iloczyn składowej pionowej naprężenia efektywnego w gruncie w poziomie podstawy pala oraz współczynnika nośności podstawy pala zgodnie z równaniem (14).

$$\sigma_{1,gr} = (\sigma'_v)_b N_q \quad (14)$$

gdzie:

N_q – współczynnik nośności podstawy pala [–],

$(\sigma'_v)_b$ – pionowa składowa efektywnego naprężenia w gruncie w poziomie podstawy pala [kPa].

We wzorze (14) wartość N_q uzależniona jest od kąta tarcia wewnętrznego i wynosi od 5 do ponad 200.

3.3.2. Formowanie się oporu podstawy wraz z osiadaniem głowicy pala

Graniczny opór podstawy dotyczy stanu krytycznego naprężenia w gruncie pod podstawą pala. Jest on osiągany przy znacznych osiadaniach wynoszących w przybliżeniu 10% średnicy pala (Gwizdała, 2010). Przyjmuje się, że maksymalny opór poboczniczy pala osiągany jest przy znacznie mniejszych wartościach, zatem kryterium osiadania dotyczące osiągnięcia granicznego oporu podstawy stosuje się również do nośności całego pala.

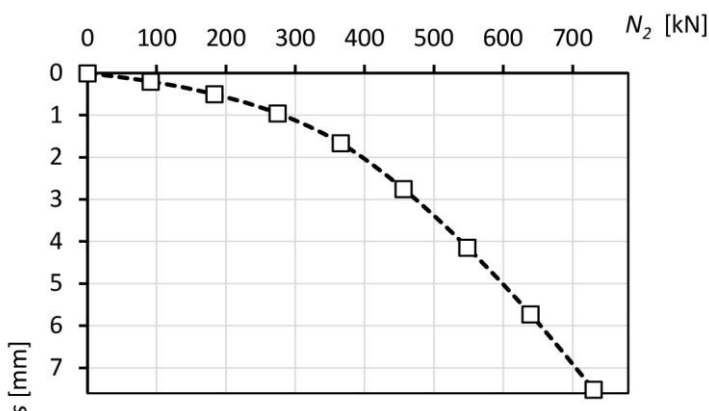
3.4. Zależność obciążenie–osiadanie głowicy pala

Bardzo ważna w analizie współpracy pala z gruntem jest zależność obciążenie–osiadanie. Zazwyczaj określana jest na podstawie wyników badania próbnego obciążenia statycznego. Przykładowe stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zdjęcia stanowiska badawczego do próbnego obciążenia pala
(Żarkiewicz, 2012)

Badanie polega na obciążaniu pała statycznie w stopniach, przy których mierzy się osiadanie głowicy. Za jeden punkt pomiarowy przyjmuje się wartość statycznego obciążenia i odpowiadające mu ustabilizowane osiadanie głowicy. Punkty uzyskane z badania tworzą zależność zwaną krzywą osiadania pała (rys. 6).



Rys. 6. Wyniki próbnego obciążenia statycznego pała – 1 cykl obciążenia

Próbne obciążenie statyczne może być ponadto interpretowane jako bezpośrednia metoda badania podłoża gruntowego, ponieważ w metodzie tej wyniki pomiarów zależą od parametrów podłoża gruntowego. Zaletą tego badania jest to, że najlepiej odwzorowuje współpracę fundamentu z gruntem. W odróżnieniu od badań terenowych lub laboratoryjnych możliwe jest bezpośrednie uchwycenie współpracy warstw podłoża gruntowego, wpływu wody gruntowej i ciśnienia porowego. Te wszystkie informacje są zawarte w zależności obciążenie–osiadanie pała. Odniesienie tych wyników do badań terenowych lub laboratoryjnych podłoża gruntowego nie zawsze przynosi zadowalające efekty z uwagi na takie aspekty, jak:

1. Uśrednienie profilu geotechnicznego w obszarze pała. Pał współpracuje z podłożem gruntowym w kształcie cylindra o średnicy nawet 4 m. Układ warstw, ich miąższość i parametry gruntu mogą się różnić w obszarze współpracy pała.

2. Przybliżenia i założenia przyjęte do korelacyjnego określenia parametrów geotechnicznych np. z sondowania CPT.
3. Błędy pomiarowe.
4. Określenie parametrów podłoża gruntowego w stanie naprężenia, który nie jest tożsamy ze stanem naprężenia występującym podczas próbnego obciążenia statycznego pala.
5. Przybliżenie geometrii pala i jego parametrów fizycznych.
6. Proces technologii wykonania pala wpływa na zmianę warunków grunto-wodnych w jego otoczeniu. Zatem pal współpracuje z gruntem zmienionym w stosunku do pierwotnie zbadanego w badaniach terenowych i laboratoryjnych.

Te wszystkie czynniki wpłynęły na to, że za podstawę informacji o podłożu gruntowym przyjęto wynik próbnego obciążenia statycznego w postaci krzywej obciążenie–osiadanie pala.

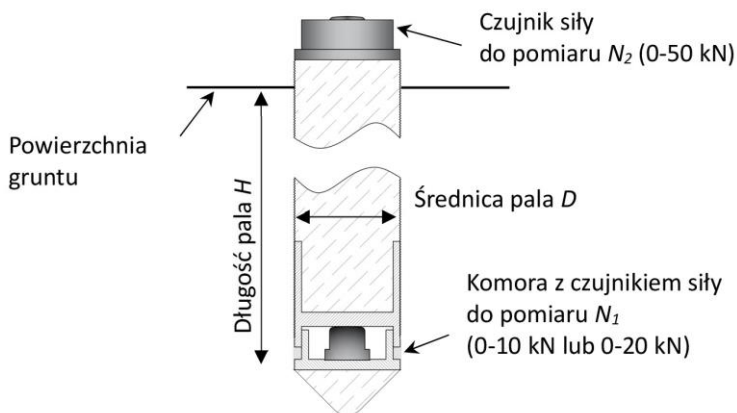
4. Eksperymentalne badania laboratoryjne próbnych obciążeń statycznych pali

4.1. Badanie rozkładu oporów na pobocznicy i podstawę pali z wykorzystaniem przetworników siły

Jednym z kluczowych elementów poznania współpracy pala z gruntem jest określenie oporu pobocznicy i podstawy. Można tego dokonać, mierząc opór w podstawie pala oraz siłę w jego głowicy. Następnie opór pobocznicy może być określony z równania równowagi sił (3). Równanie to jest spełnione dla każdego stopnia obciążenia, przy którym mierzone jest osiadanie pala. W związku z tym równanie (3) można przedstawić w funkcji osiadania (15):

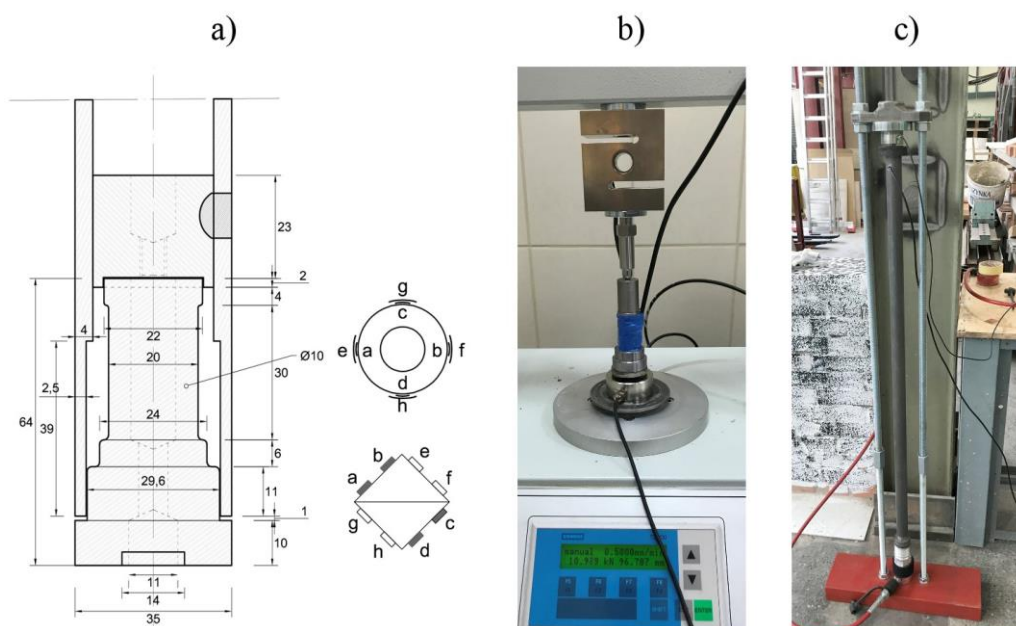
$$T(s) = N_2(s) - N_1(s) \quad (15)$$

W celu zbadania oporu podstawy przygotowano pale wyposażone w dodatkowe czujniki siły zamontowane w podstawie. Do pomiaru wykorzystano tensometryczne przetworniki siły o zakresie pomiarowym 0–10 kN i 0–20 kN. Do pomiaru siły przykładanej w głowicy pala zastosowano tensometryczny przetwornik siły o zakresie 0–50 kN. Schemat pomiaru oporu podstawy pala przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Schemat wyposazenia pala w czujniki siły w głowicy i podstawie pala

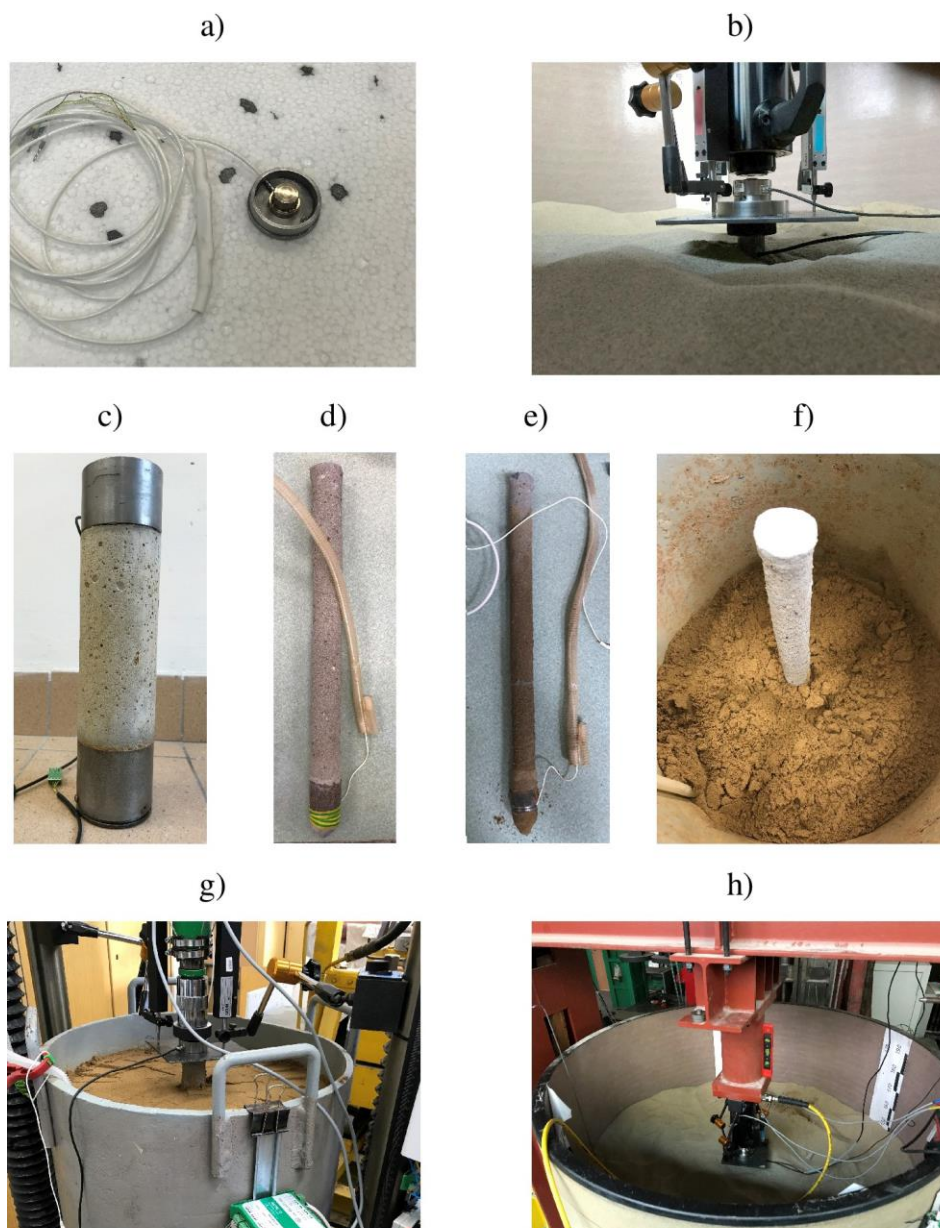
Pale stalowe wykonano z rury, która była wyposażona w zintegrowany przetwornik siły zgodnie ze schematem (rys. 8).



Rys. 8. Pal stalowy i opomiarowanie podstawy pala w czujnik siły: a) schemat przetwornika siły; b) kalibracja czujnika w maszynie wytrzymałościowej; c) kalibracja pala w ramie obciążającej

Komora z czujnikiem siły do pomiaru oporu podstawy pala działa na zasadzie tłoka. Dolna część może się przemieszczać względem górnej, co zapewnia, że cały opór podstawy jest przekazywany poprzez przetwornik siły na trzon pala. Komora została wykonana z dwóch pierścieni: zewnętrznego połączonego z trzonem oraz wewnętrznego połączonego z podstawą pala. Na połączeniu trzonu pala z komorą zastosowano elastyczne dylatacje osłonięte od gruntu za pomocą elastycznej taśmy (rys. 9c–e), w celu uniemożliwienia dostania się zanieczyszczeń pomiędzy pierścieniem.

Zdjęcia przetworników siły oraz oprzyrządowanych pali przedstawiono na rys. 9a–f. W badaniach wykorzystano dwa zbiorniki o średnicy 48 cm i wysokości 60 cm (rys. 9g) oraz o średnicy 150 cm i wysokości 150 cm (rys. 9h).



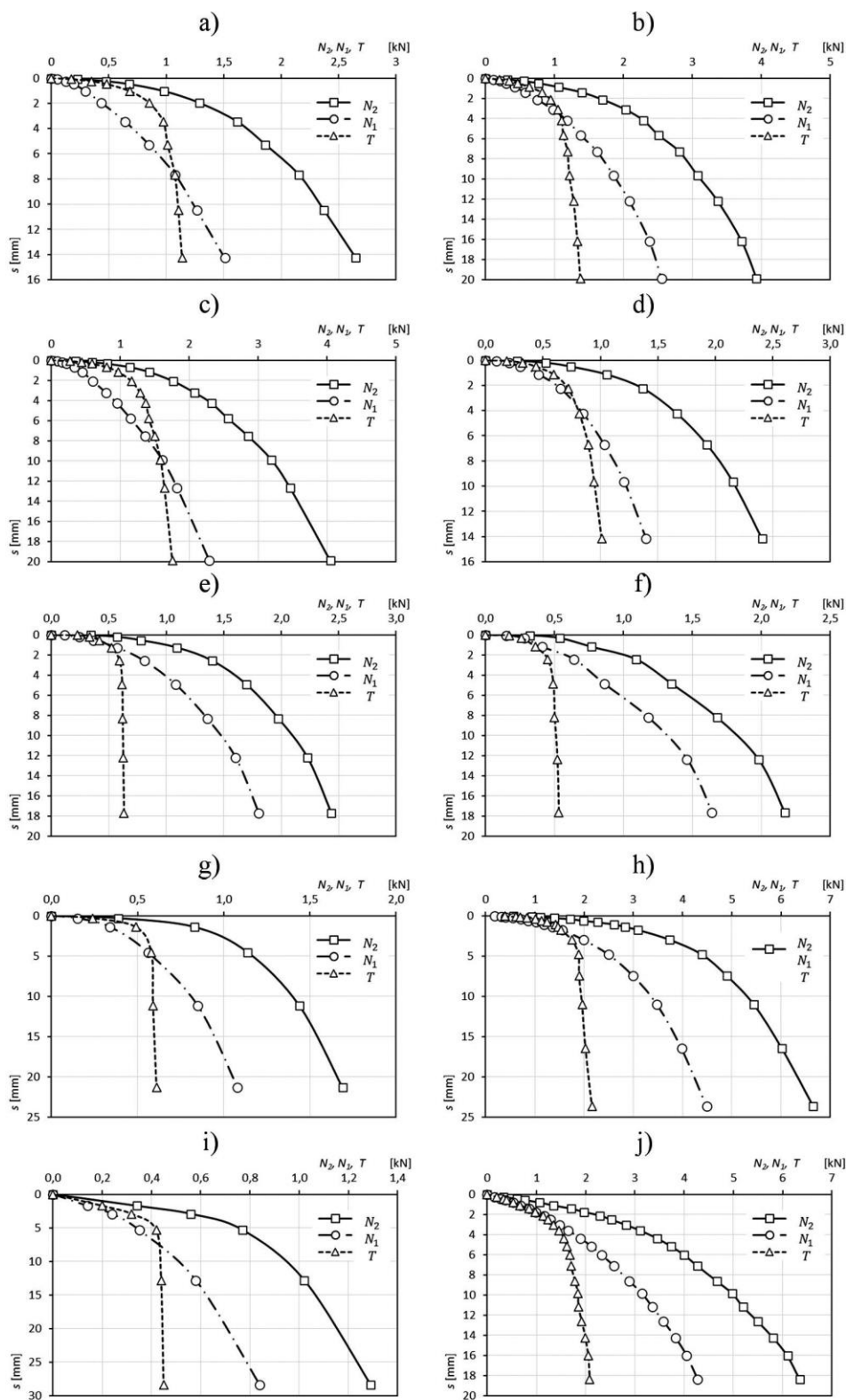
Rys. 9. Stanowisko badawcze do eksperymentalnych próbnych obciążeń pali:
a) czujnik siły montowany w podstawie pala; b) widok na głowicę pala wraz z czujnikiem siły w głowicy i czujnikami przemieszczeń; c) oprzyrządowany pal o średnicy 7 cm; d) oprzyrządowany pal o średnicy 2,5 cm; e) oprzyrządowany pal o średnicy 2,8 cm; f) widok na pal podczas wypełniania komory gruntem; g) komora o średnicy 48,5 cm wraz z palem przygotowanym do badań; h) komora o średnicy 150 cm wraz z palem przygotowanym do badań

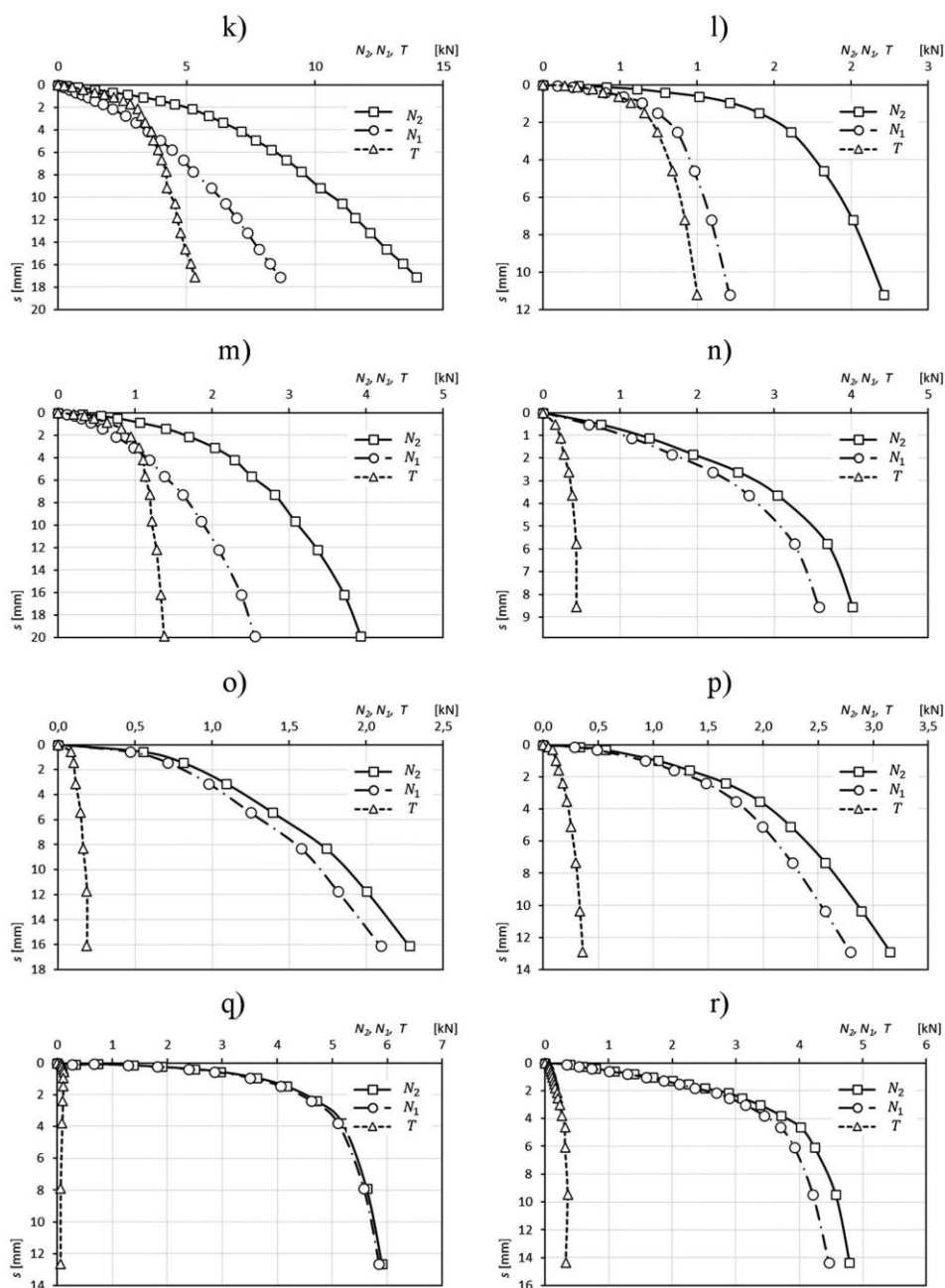
Pale betonowe były wykonywane w dwóch technologiach: o gładkiej powierzchni w formie z rury PCV oraz o powierzchni chropowatej w gruncie przy wykorzystaniu druku 3D. Pale stalowe wykonano z rury. Długość pali betonowych wynosiła 40 cm, a stalowych – 105 cm. Średnice pali wynosiły 2,5–7 cm. W ten sposób pale miały stosunek długości do średnicy H/D wynoszący 2,5–30,0. Wcześniejsze badania dla mniejszych stosunków H/D wykazały, że przy osiągnięciu stanu granicznego nośności dochodzi do spękania powierzchni i wyparcia gruntu, co jest charakterystyczne dla fundamentów bezpośrednich (Meyer i Żarkiewicz, 2015; Żarkiewicz, 2017). Przebadano pale o średnicach: 2,86 cm, 4,64 cm, 7,00 cm i 10,64 cm oraz zagłębieniu w gruncie: 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm. Łącznie wykonano 80 próbnych obciążeń statycznych w celu określenia charakterystyk obciążenie–osiadanie pali o różnych geometriach.

W badaniach eksperymentalnych próbnych obciążeń w warunkach laboratoryjnych przebadano pale o różnej geometrii, materiale i powierzchni pobocznej. Specyfikacje pali wybranych testów próbnych obciążeń statycznych przedstawiono w tabeli 2, a wyniki badań zobrazowano ponadto na rys. 10a–r.

Tabela 2. Specyfikacja wybranych pali

Nr pala	Rys. 10	Średnica D [cm]	Długość H [cm]	Powierzchnia pala
P1	a)	2,8	40	chropowata betonowa
P2	b)	2,8	40	chropowata betonowa
P3	c)	2,8	40	chropowata betonowa
P4	d)	2,8	40	chropowata betonowa
P5	e)	2,5	40	gładka betonowa
P6	f)	2,5	40	gładka betonowa
P7	g)	4,0	40	chropowata betonowa
P8	h)	4,0	40	chropowata betonowa
P9	i)	4,0	40	chropowata betonowa
P10	j)	4,0	40	chropowata betonowa
P11	k)	4,0	40	chropowata betonowa
P12	l)	3,5	105	gładka stalowa
P13	m)	3,5	105	gładka stalowa
P14	n)	7,0	20	gładka betonowa
P15	o)	7,0	20	gładka betonowa
P16	p)	7,0	20	gładka betonowa
P17	q)	7,0	20	gładka betonowa
P18	r)	7,0	20	gładka betonowa





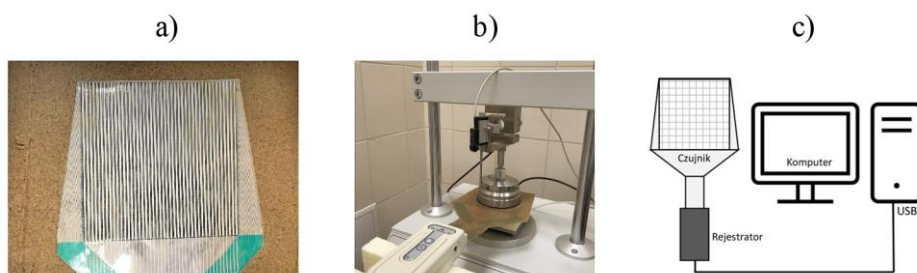
Rys. 10. Wyniki próbnego obciążeń statycznych pali według zestawienia w tabeli 2

Analizując wyniki pomiarów badanych pali, stwierdzono, że opór poboczniczy mobilizował się bardzo szybko i już przy osiadaniach w przybliżeniu w zakresie 2–8 mm osiągnął maksymalny opór, który następnie się stabilizował, ulegał redukcji lub nieznacznie się zwiększał. Opór podstawy początkowo mobilizował się w przybliżeniu liniowo w stosunku do osiadania pala, lecz po osiągnięciu osiadania w zakresie 2–8 mm obserwowana była zmiana charakteru mobilizacji i wyraźne zwiększenie przyrostu osiadania w stosunku do oporu podstawy pala.

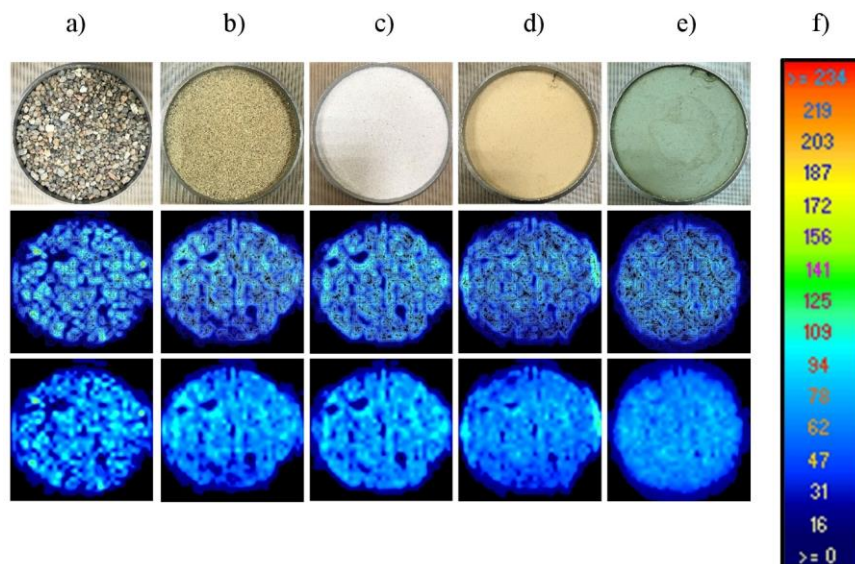
4.2. Badania zmian naprężenia w gruncie wokół pala przy wykorzystaniu dotykowych, elastycznych map rozkładu naprężenia

Obciążenie przekazywane z pala do podłoża gruntowego zmienia stan naprężenia w gruncie. Nośność graniczna pala wynika z osiągnięcia stanu granicznego naprężenia w jego otoczeniu. Pomiar naprężeń w gruncie wymaga zastosowania metody pomiaru, która w jak najmniejszym stopniu zakłóci sposób przekazywania obciążenia. Całkowite wyeliminowanie tego wpływu jest trudne do osiągnięcia, ponieważ każdy element wprowadzony do gruntu zaburza sposób przekazywania naprężenia i przemieszczenia. Czujnik mierzący naprężenia musi się charakteryzować małymi wymiarami, dużą czułością i co najważniejsze elastycznością lub sztywnością zbliżoną do sztywności gruntu. W tym celu do pomiaru naprężenia w gruncie zastosowano elastyczne czujniki naprężeń, które pozwalają na określenie rozkładu nacisku na badanej powierzchni. Wykorzystany czujnik miał zaledwie 0,102 mm grubości, a jego elastyczność, porównywalna z folią polimerową, pozwalała na dopasowanie kształtu do mierzonej powierzchni. Z uwagi na dość dużą sztywność wzdłużną czujnik może stanowić element zbrojenia gruntu. Jednak z uwagi na gładką powierzchnię siły styczne na powierzchni czujnika są w przybliżeniu zerowe. Czujnik umożliwił pomiar składowych sił nacisku na powierzchni o wymiarach 118,8 mm × 118,8 mm w 1936 punktach

pomiarowych zwanych senselami. Umożliwiło to uzyskanie rozdzielczości pomiaru na badanej powierzchni wynoszącej 15,5 punktów pomiarowych na 1 cm^2 , co odpowiada pomiarom co 2,5 mm na szerokości i długości czujnika. Pomiar mógł być zapisywany w sposób ciągły z maksymalną częstotliwością 100 Hz. Zakres pomiarowy zastosowanych map naprężeń wynosił od 0 kPa do 41 kPa, 345 kPa, 1034 kPa, 2413 kPa, w zależności od użytego czujnika. Zdjęcie czujnika, kalibrację i schemat podłączenia przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Czujnik rozkładu nacisku: a) zdjęcie czujnika; b) kalibracja w maszynie wytrzymałościowej; c) schemat podłączenia



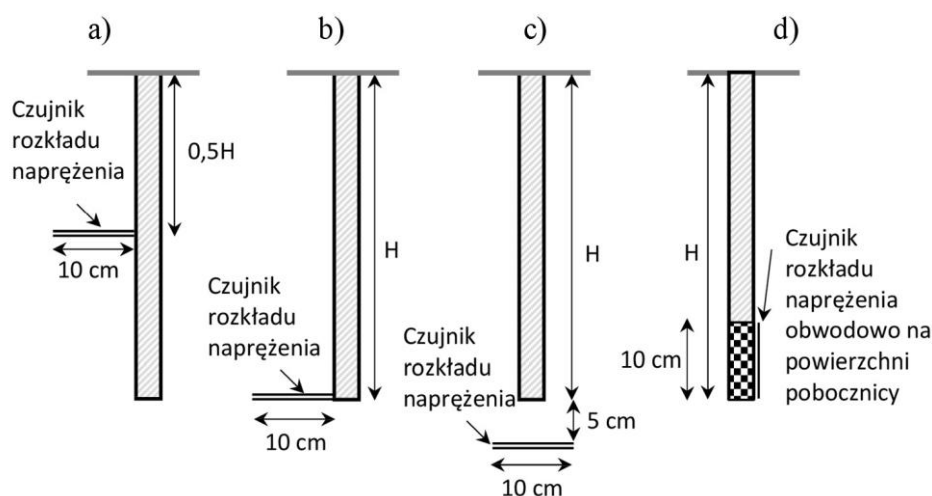
Rys. 12. Rozkłady naprężeń uzyskanych przez to samo obciążenie w różnych gruntach: a) żwir; b) piasek średni; c) piasek drobny; d) pył; e) ił; f) legenda – wartości w kPa (Żarkiewicz i Qatrameez, 2021)

Żeby zweryfikować możliwości stosowania czujnika rozkładu naprężenia do pomiarów w gruncie, wykonano szereg badań rozkładu naprężenia w różnych gruntach i szczegółowo opisano (Żarkiewicz i Qatrameez, 2021). Wyniki badań przedstawione na rys. 12 wskazują, że w przypadku gruntów drobnoziarnistych rozkład nacisku jest bardziej równomierny niż w gruntach gruboziarnistych. Jest to przyczyną tworzenia się strumieni przekazywania sił kontaktowych pomiędzy ziarnami, co zostało zaobserwowane i opisane również przez innych badaczy (Majmudar i Behringer, 2005; Wood, 2005).

Badania rozkładu naprężenia w gruncie wykonywano w czterech różnych schematach:

- I. Poziomo, na głębokości połowy długości pala, przy pobocznicy (rys. 13a).
- II. Poziomo, na głębokości podstawy pala, przy pobocznicy (rys. 13b).
- III. Poziomo, na głębokości 5 cm poniżej podstawy, pod podstawą (rys. 13c).
- IV. Pionowo, bezpośrednio na pobocznicy pala, przy podstawie (rys. 13d).

W schematach I–III mierzona była składowa pionowa naprężenia w gruncie, a w schemacie IV składowa radialna (pozioma). Zmiana naprężenia w gruncie rejestrowana była podczas badań obciążeń statycznych pali w warunkach laboratoryjnych.



Rys. 13. Schematy lokalizacji czujnika rozkładu naprężenia

Zmianę składowej pionowej naprężenia w gruncie w otoczeniu poboczniczy pala opisano funkcją (16).

$$\sigma_{v,s}(r) = \sigma_{v,s,0} \exp \left[-C_{s,0} \left(\frac{r-r_0}{r_0} \right)^2 \right] \quad (16)$$

gdzie:

$\sigma_{v,s}(r)$ – składowa pionowa naprężenia w gruncie w odległości r od osi pala [kPa],

$\sigma_{v,s,0}$ – obliczona składowa pionowa naprężenia w gruncie przy poboczniczy pala [kPa],

$C_{s,0}$ – bezwymiarowa stała [-].

Analizy statystyczne wykazały, że zmienność $C_{s,0}$ jest nieznaczna i w obliczeniach składowej pionowej naprężenia w gruncie można przyjąć jej wartość jako stałą, niezależną od stopnia obciążenia pala.

W celu określenia, jaka siła przekazywana jest do podłoża gruntowego w badanym poziomie, należy obliczyć całkę ze składowej pionowej naprężenia w gruncie (17).

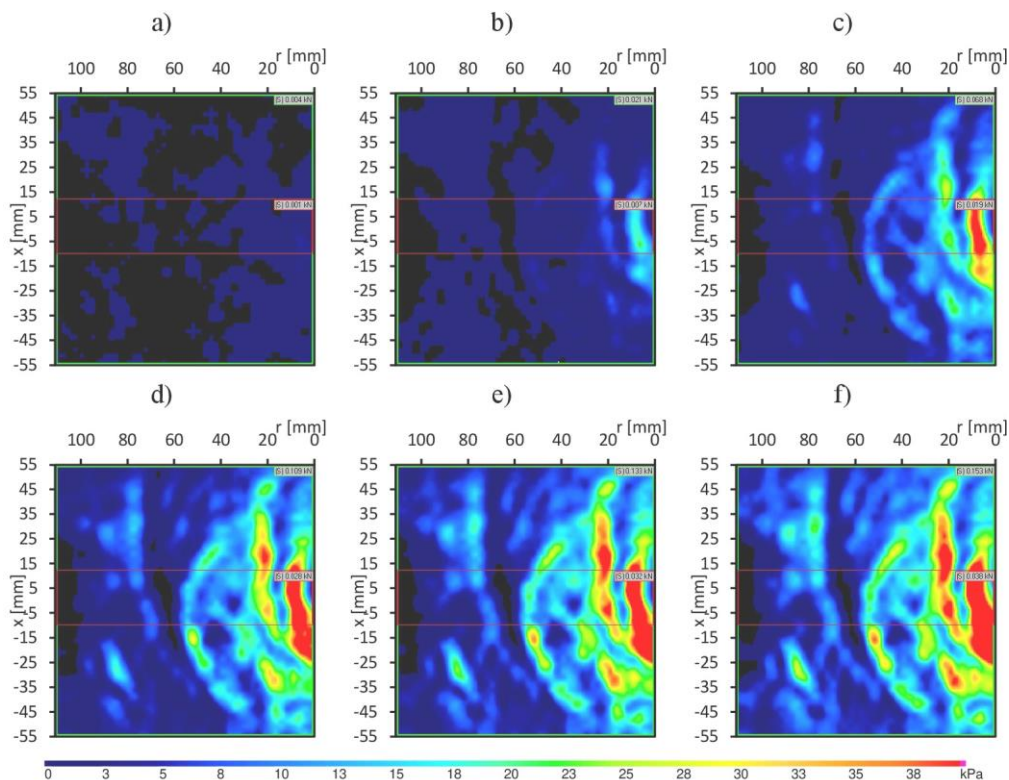
$$\int_{r_0}^{\infty} \sigma_{v,s}(r) r dr = \frac{\sigma_{v,s,0}}{C_{s,0}} \pi r_0^2 \left[1 + \sqrt{\pi C_1} \right] \quad (17)$$

Przed przystąpieniem do analizy zmian naprężeń w gruncie spowodowanych wciskaniem pala wyzerowano początkowy stan naprężenia, który występował w gruncie, a spowodowany był naprężeniami geostatycznymi i zagęszczaniem gruntu. Po wyzerowaniu naprężeń początkowych możliwe było do uchwycenia, jak zmienia się składowa pionowa naprężenia w gruncie spowodowana występowaniem oporu poboczniczy i podstawy pala.

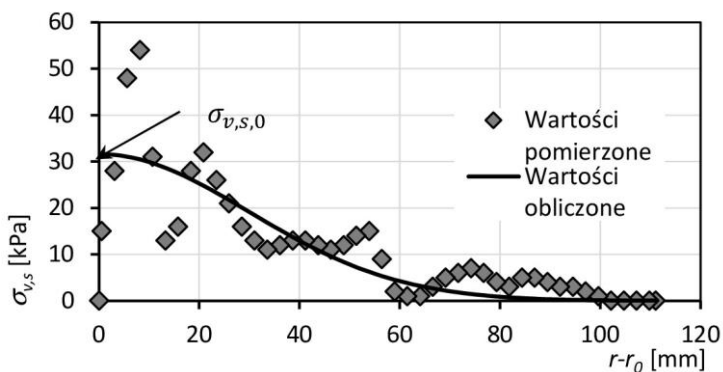
Mapy rozkładu składowej pionowej naprężenia w schemacie I w różnych stopniach obciążenia przedstawiono na rys. 14. Współrzędna (0,0) jest punktem przy poboczniczy pala.

Z map rozkładu naprężenia przedstawionych na rys. 14 analizowano jedynie wycinek przyległy do poboczniczy pala. Przykład uśrednionego na wycinku naprężenia w stosunku do odległości od poboczniczy pala wraz z aproksymacją

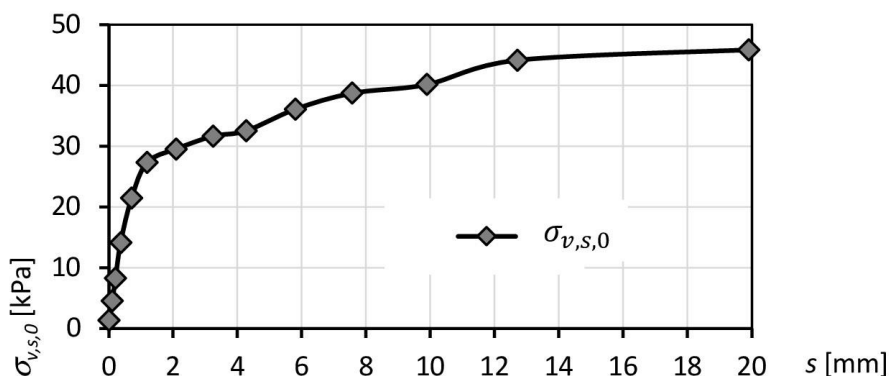
równaniem (16) metodą najmniejszej sumy kwadratów odchyłek przedstawiono na rys. 15.



Rys. 14. Mapy naprężeń w gruncie w schemacie I w różnych stopniach obciążenia pala P3: a) $N_2 = 0,00$ kN; b) $N_2 = 0,59$ kN; c) $N_2 = 1,14$ kN; d) $N_2 = 1,76$ kN; e) $N_2 = 2,32$ kN; f) $N_2 = 2,86$ kN



Rys. 15. Przykładowy wynik aproksymacji zmiany składowej pionowej naprężenia w gruncie w otoczeniu pala P3, pomiar przy $N_2 = 1,76$ kN



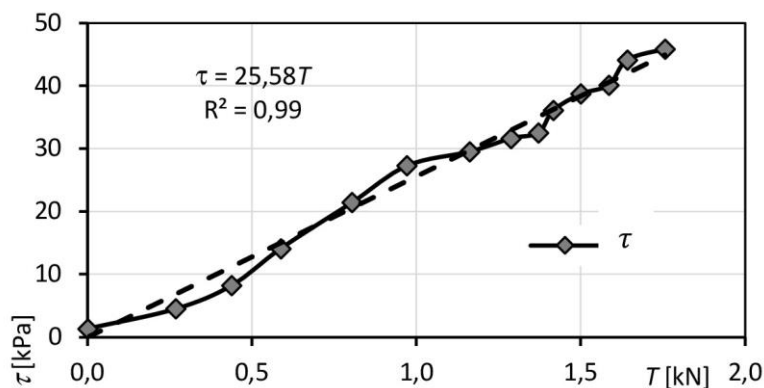
Rys. 16. Zależność składowej pionowej naprężenia w gruncie przy poboczniczy pala P3 od osiadania jego głowicy

Zmianę składowej pionowej naprężenia przy poboczniczy w zależności od osiadania głowicy pala przedstawiono na rys. 16. Składowa pionowa naprężenia przy poboczniczy pala rośnie wraz z osiadaniem początkowo w przybliżeniu liniowo, co jest związane z narastającym ugięciem przestrzeni gruntowej, lecz po osiągnięciu osiadania w przybliżeniu równego 2 mm dalszy przyrost składowej pionowej naprężenia w gruncie jest już mniej wyraźny.

Składowa pionowa naprężenia w gruncie bezpośrednio przy poboczniczy jest bardzo trudna do zmierzenia. Zastosowany czujnik rozkładu naprężenia umożliwił pomiar składowej pionowej w bliskim sąsiedztwie poboczniczy pala wynoszącym 1–5 mm. Po aproksymacji zmiany rozkładu naprężenia w funkcji odległości od poboczniczy pala (równanie 15) otrzymano wartość składowej pionowej naprężenia w gruncie bezpośrednio na poboczniczy, która w tym miejscu jest równa składowej stycznej naprężenia. Zatem w dalszej analizie można założyć następującą równość (18).

$$\tau = \sigma_{v,s,0} \quad (18)$$

Zależność składowej stycznej naprężenia na poboczniczy pala od całkowitego oporu poboczniczy jest w przybliżeniu linowa, jak to przedstawiono na rys. 17.



Rys. 17. Składowa styczna naprężenia na pobocznicy pala P3 w zależności od jej całkowitego oporu

Opór pobocznicy może być obliczony jako wartość średnia składowej stycznej naprężenia na pobocznicy pomnożona przez pole powierzchni pobocznicy pala (19).

$$T = \tau_{sr} A_s \quad (19)$$

Uwzględniając geometrię badanego pala $D = 0,028$ m oraz $H = 0,4$ m, otrzymano równanie (20).

$$T = \tau_{sr} 28,42 \quad (20)$$

Zatem stosunek składowej stycznej naprężenia na pobocznicy na głębokości równej połowie długości pala do średniej wartości składowej stycznej naprężenia wynosi (21).

$$\frac{\tau}{\tau_{sr}} = \frac{25,58}{28,42} = 90\% \quad (21)$$

Ponadto wykazano, że po osiągnięciu maksymalnego oporu pobocznicy pala składowa styczna naprężenia również osiągała maksymalną wartość. Zatem siła przekazywana przez część pobocznicy pala powyżej połowy zagłębienia była jedynym czynnikiem wpływającym na rozkład składowej pionowej naprężenia w gruncie wokół pobocznicy na głębokości równej połowie zagłębienia. Obliczając całkę naprężeń, można określić wartość oporu pobocznicy, jaki został

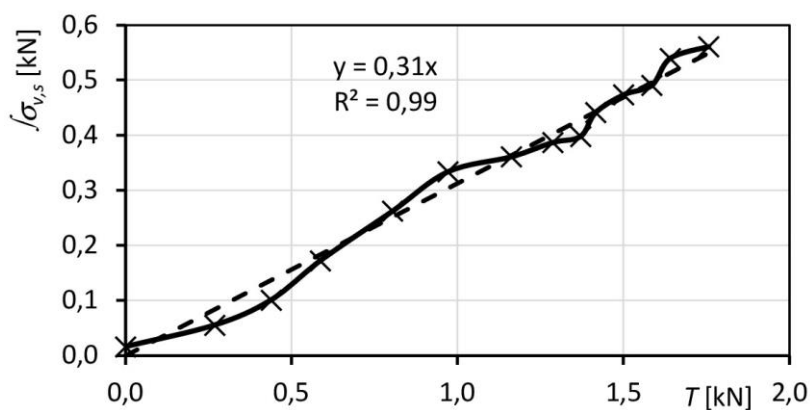
utworzony w górnej części pala powyżej połowy jego długości. Zależność przedstawiona na rys. 18 jest w przybliżeniu liniowa, a współczynnik kierunkowy prostej określono na 0,31. Oznacza to, że 31% całkowitego oporu pobocznicy realizowanych jest poprzez oddziaływanie pobocznicy powyżej połowy zagłębienia pala w gruncie.

W badaniach w schemacie II mierzono składową pionową naprężenia w gruncie przy pobocznicy pala w poziomie zagłębienia jego podstawy. Bezpośrednie pomiary przedstawiono na rys. 19.

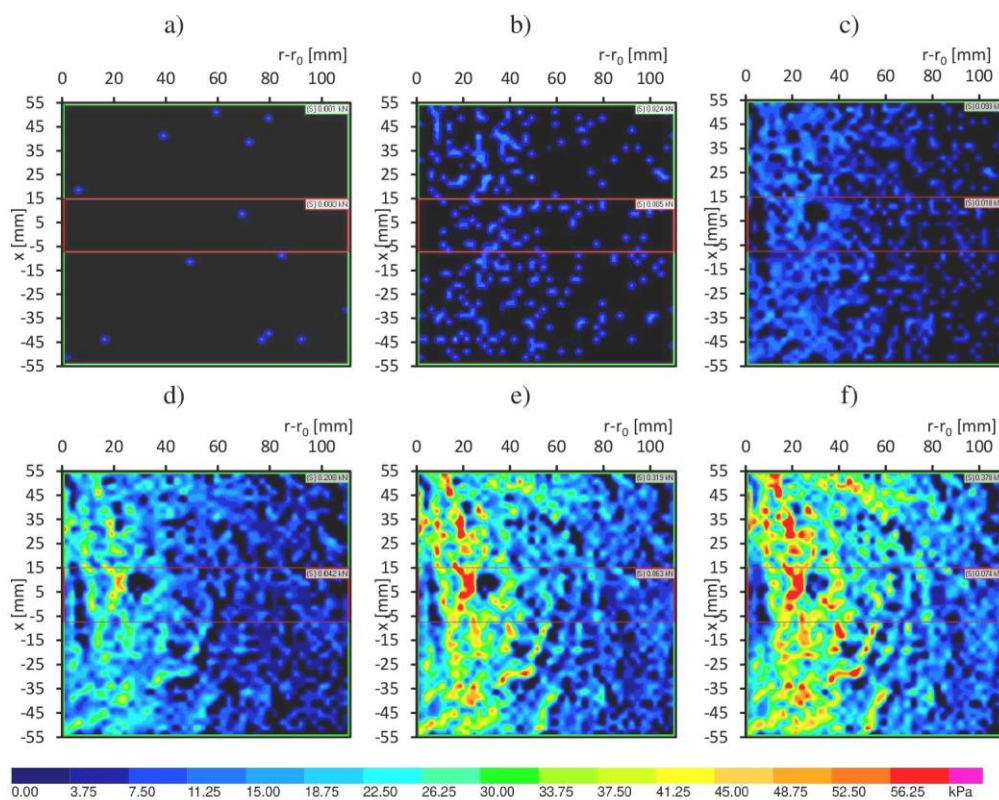
Z każdej mapy naprężeń wybrano wycinek do analizy w celu otrzymania zależności składowej pionowej naprężenia w gruncie od odległości od pobocznicy pala. Wyniki tej zależności wraz z aproksymacją równaniem (16) przedstawiono na rys. 20.

W badaniach zauważono, że naprężenia nie zanikają tak szybko wraz z odległością od pobocznicy pala, jak to miało miejsce w schemacie I. Ponadto bezpośrednio przy pobocznicy składowa pionowa ulega silnej redukcji. Jest to spowodowane wpływem krawędzi podstawy pala. Zjawisko to może być wyjaśnione większym ugięciem przestrzeni gruntowej spowodowanym oddziaływaniem podstawy pala niż ugięcie przestrzeni gruntowej wokół pobocznicy. Pokazano to na rys. 21, który w schemacie a) przedstawia stan ugięcia przestrzeni gruntowej i kierunki przemieszczeń gruntu spowodowanych oddziaływaniem pobocznicy i podstawy pala na początku obciążenia pala, a w schemacie c) przy obciążeniu bliskim wartości granicznej.

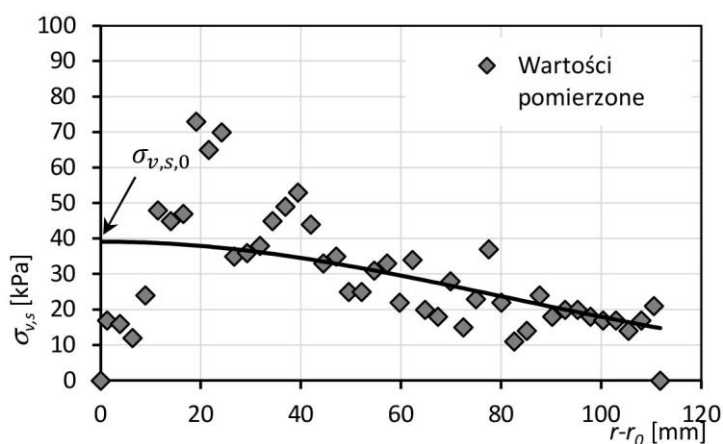
Podobnie jak w schemacie I przyjęto, że składowa styczna naprężenia na pobocznicy pala jest równa składowej pionowej naprężenia w gruncie bezpośrednio przy pobocznicy pala obliczonej z równania (16). Wówczas otrzymano zależność składowej stycznej naprężenia w gruncie przy pobocznicy pala od osiadania głowicy (rys. 22).



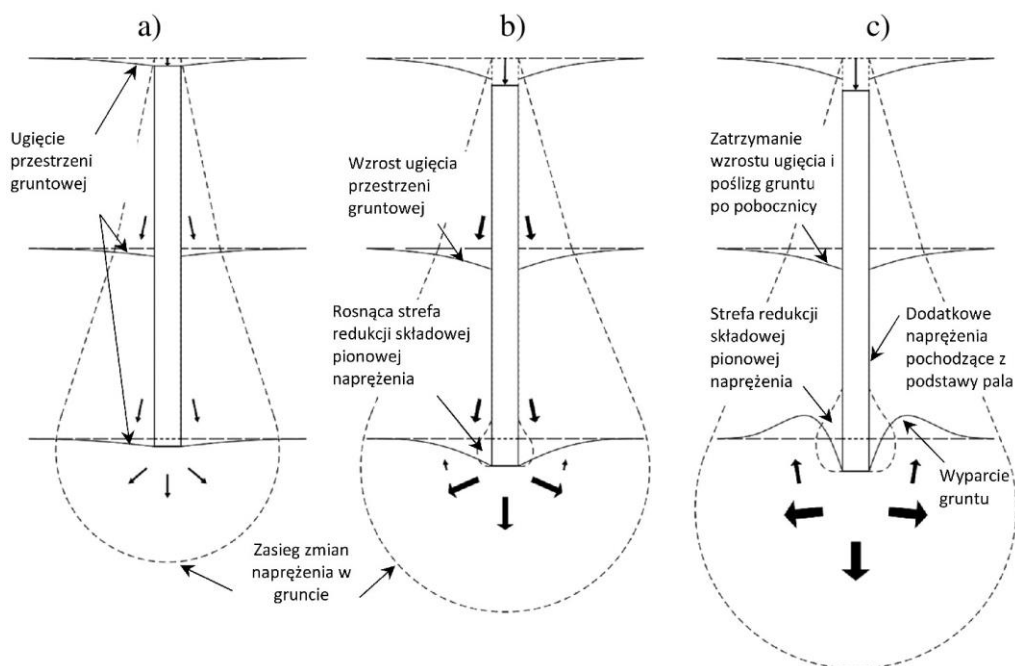
Rys. 18. Zależność całki składowej pionowej naprężenia w gruncie przy poboczniczy pala P3 od jej całkowitego oporu



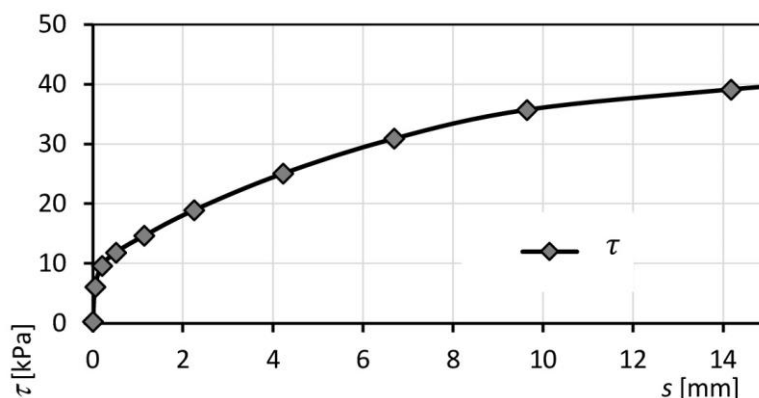
Rys. 19. Mapy naprężeń w gruncie w schemacie II w różnych stopniach obciążenia pala P4: a) $N_2 = 0,00$ kN; b) $N_2 = 0,52$ kN; c) $N_2 = 1,06$ kN; d) $N_2 = 1,66$ kN; e) $N_2 = 2,15$ kN; f) $N_2 = 2,66$ kN



Rys. 20. Przykładowy wynik aproksymacji zmiany składowej pionowej naprężenia w gruncie w otoczeniu pala P4 – schemat II, pomiar przy $N_2 = 2,41$ kN



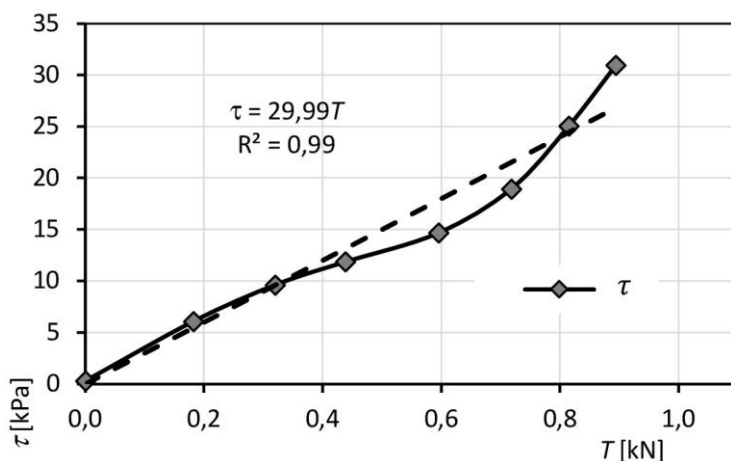
Rys. 21. Etapy deformacji podłoża gruntowego przy wciskaniu pala



Rys. 22. Zależność składowej stycznej naprężenia w gruncie na poboczniczy pala P4 od osiadania głowicy – schemat II

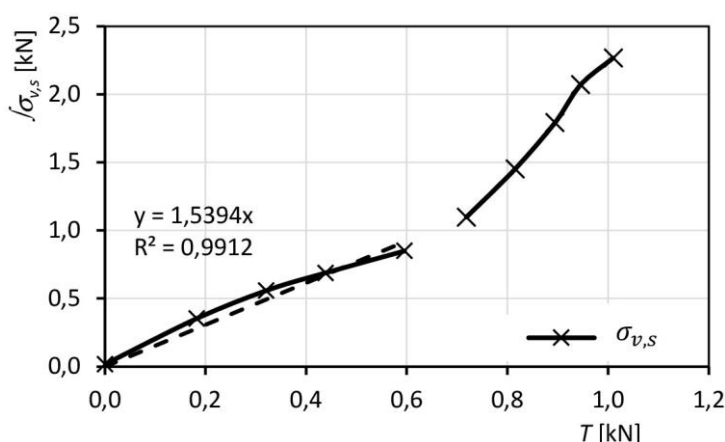
W tym przypadku składowa styczna rośnie w stosunku do osiadania w sposób nieliniowy, w którym osiadanie pala powoduje coraz mniejsze przyrosty składowej stycznej naprężenia na jego poboczniczy.

Zależność składowej stycznej naprężenia na poboczniczy od jej oporu w analizowanym schemacie II jest również w przybliżeniu liniowa, jak w schemacie I (rys. 23). W tym przypadku współczynnik kierunkowy prostej aproksymującej wynosi 29,99.



Rys. 23. Zależność składowej stycznej naprężenia w gruncie na poboczniczy pala P4 od jej całkowitego oporu – schemat II

Analizując całkę składowej pionowej naprężenia w gruncie wokół poboczniczy pala przy podstawie, można zauważyć, że ma charakter biliniowy (rys. 24). Ponadto współczynnik kierunkowy przyrostu tej całki w stosunku do oporu poboczniczy pala jest większy od 1, co oznacza, że nie tylko pobocznica pala wpływa na zmianę składowej pionowej naprężenia w gruncie w poziomie podstawy pala, lecz również jego podstawa. Nachylenie wykresu jest większe w drugiej fazie obciążenia, gdy opór poboczniczy bliski jest wartości maksymalnej. Wówczas na rozkład naprężenia w poziomie podstawy pala ma wpływ głównie podstawa.



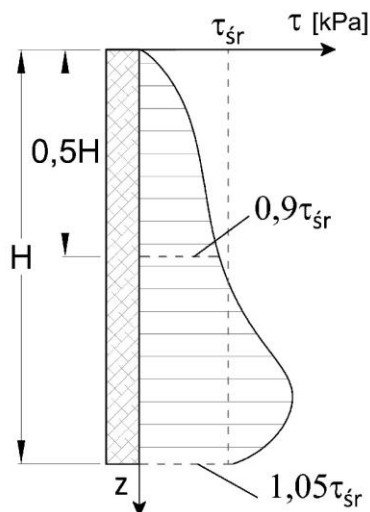
Rys. 24. Zależność całki składowej pionowej naprężenia w gruncie przy poboczniczy pala P4 od całkowitego oporu poboczniczy

Stosunek składowej stycznej naprężenia do średniej wartości składowej stycznej na poboczniczy pala jest równy (22).

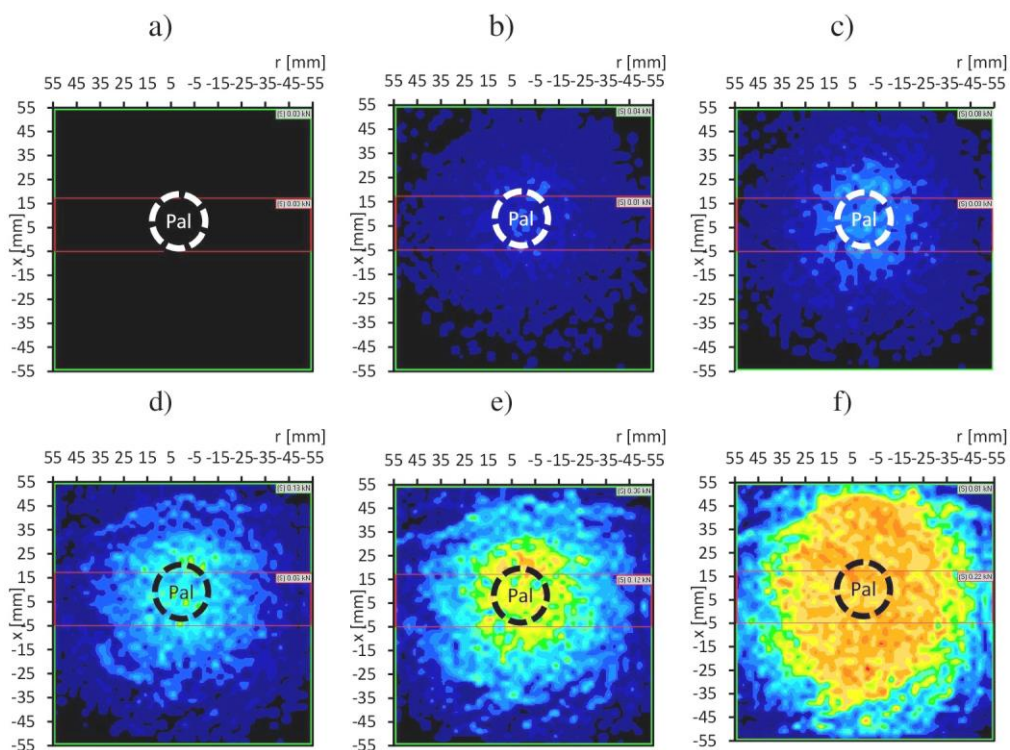
$$\frac{\tau}{\tau_{sr}} = \frac{29,99}{28,42} = 106\% \quad (22)$$

Przedstawione zależności pozwoliły na określenie schematu rozkładu składowej stycznej naprężenia na poboczniczy na długości pala (rys. 25).

W badaniach w schemacie III sprawdzano, jak rozkładają się naprężenia w gruncie spowodowane wciskaniem pala. Czujnik rozkładu naprężenia był umieszczany 5 cm poniżej podstawy pala, symetrycznie względem jego osi. Rozkład naprężenia przedstawiono na rys. 26.



Rys. 25. Schemat zmiany składowej stycznej naprężenia w gruncie na długości pala



Rys. 26. Mapy naprężeń w gruncie w schemacie III w różnych stopniach obciążenia pala P19: a) $N_2 = 0,00$ kN; b) $N_2 = 0,30$ kN; c) $N_2 = 0,66$ kN; d) $N_2 = 0,98$ kN; e) $N_2 = 1,29$ kN; f) $N_2 = 1,61$ kN

Żeby wyeliminować początkowy stan naprężenia w gruncie, w trakcie analizy wyzerowano naprężenia stanu początkowego, kiedy zarówno obciążenie w głowicy pala, jak i osiadanie są równe 0 (rys. 26a).

W dalszej analizie sprawdzono, jak zmieniają się naprężenia na badanym poziomie w danym stopniu obciążenia w stosunku do odległości od osi pala. Wyniki rozkładu aproksymowano funkcją (23).

$$\sigma_{v,b}(r) = \sigma_{v,b,0} \exp \left[-C_{b,0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (23)$$

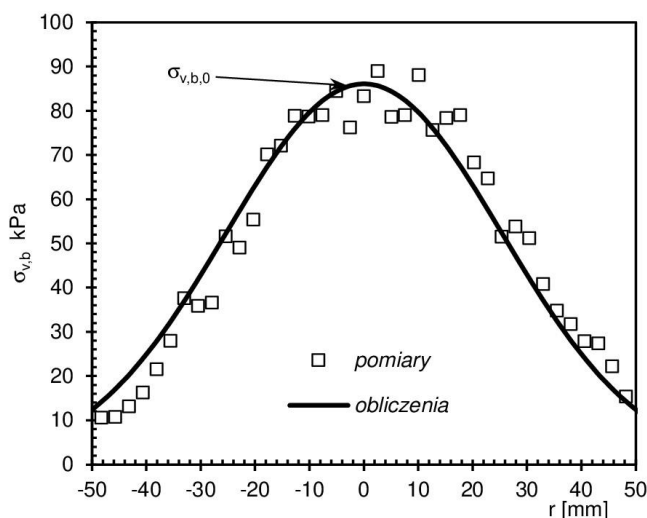
gdzie:

$\sigma_{v,b}(r)$ – składowa pionowa naprężenia w gruncie pod podstawą pala w odległości r od jego osi [kPa],

$\sigma_{v,b,0}$ – obliczona składowa pionowa naprężenia w gruncie pod podstawą pala w jego osi [kPa],

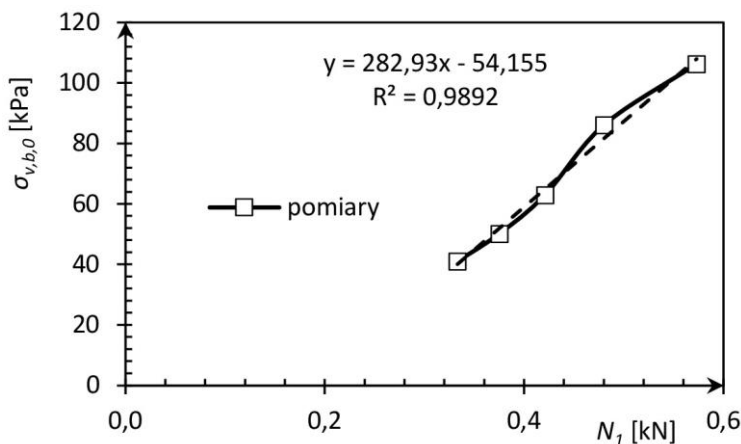
$C_{b,0}$ – bezwymiarowa stała [–].

Przykładowy rozkład składowej pionowej naprężenia przedstawiono na rys. 27.



Rys. 27. Przykładowy wynik aproksymacji zmiany składowej pionowej naprężenia w gruncie pod podstawą pala P19, pomiar przy $N_2 = 1,29$ kN

Naprężenia na badanym poziomie kształtują się poprzez wspólne oddziaływanie pobocznic i podstawy pala. W pierwszych stopniach obciążenia, kiedy obserwowana jest intensywna mobilizacja oporu pobocznic, przyrost składowej naprężenia pod podstawą pala jest mniej wyraźny. Dopiero kiedy opór pobocznic bliski jest wartości maksymalnej, dalszy wzrost składowej pionowej naprężenia w gruncie pod podstawą pala jest spowodowany oddziaływaniem podstawy pala. Związek jest w przybliżeniu liniowy (rys. 28).



Rys. 28. Zależność składowej pionowej naprężenia w gruncie pod podstawą pala P19 w stosunku do jej oporu

Aproksymacja liniowa zależności przedstawionej na rys. 28 określa współczynnik kierunkowy prostej, który wynosi 282,93. W związku z tym przyrost składowej pionowej naprężenia w gruncie może być opisany równaniem (24).

$$\sigma_{v,b,0} = a_1 N_1 \quad (24)$$

gdzie:

a_1 – współczynnik kierunkowy prostej (24).

Po uwzględnieniu wzoru na naprężenia pod podstawą pala (25).

$$\sigma_1 = \frac{4}{\pi D^2} N_1 \quad (25)$$

oraz przyjmując (26),

$$a_1 = \frac{4}{\pi D_p^2} \quad (26)$$

otrzymuje się (27).

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{v,b,0}} = \frac{D_p^2}{D^2} \quad (27)$$

Następnie z równania (27) można obliczyć średnicę strefy D_p przekazywania naprężenia przez grunt pod podstawą pala z równania (28).

$$D_p = D \sqrt{\frac{\frac{4}{\pi D^2}}{a_1}} = D \sqrt{\frac{\frac{4}{\pi \cdot 0,025^2}}{282,93}} = 2,68D \quad (28)$$

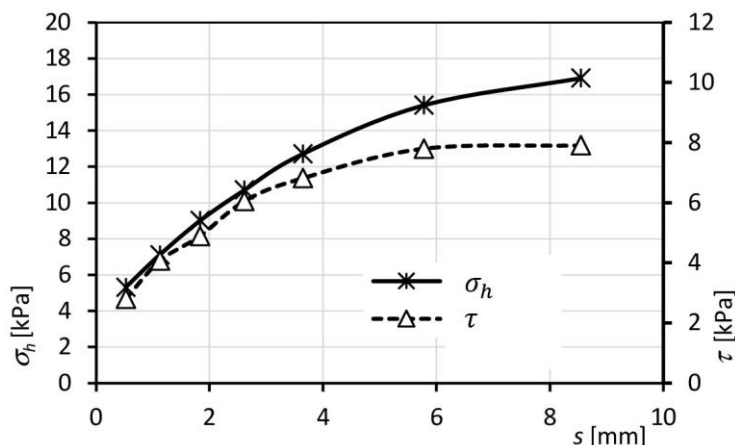
Zatem średnica strefy D_p w analizowanym przypadku wynosi $2,68 D$, co jest zgodne z wcześniejszymi badaniami dotyczącymi określenia strefy gruntu współpracującej ściśle z palem przy jego podstawie (Meyer i Żarkiewicz, 2017).

Badania zmian składowej poziomej w gruncie na pobocznicy pala realizowane były w kolejnym schemacie IV, w którym czujnik rozkładu naprężenia zamontowany był na powierzchni pobocznicy pala przy podstawie. W pomiarach zastosowano wysoce precyzyjny czujnik rozkładu nacisku o zakresie pomiarowym 0–50 kPa (rys. 29).



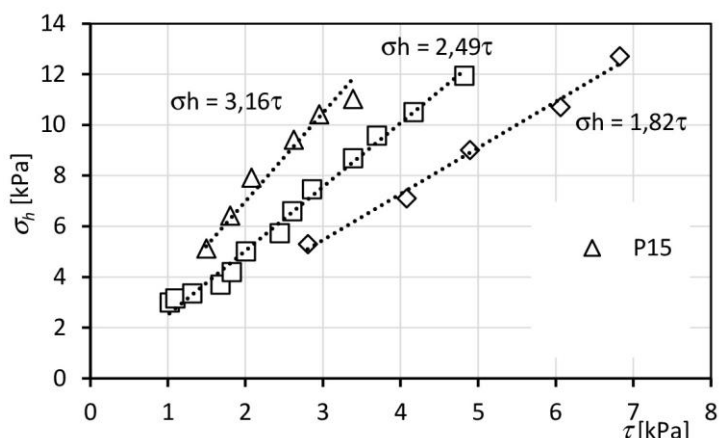
Rys. 29. Stanowisko badawcze do pomiaru składowej poziomej naprężenia w gruncie:
a) oprzyrządowany palec; b) widok na głowicę pala

Pomiaru zmian rozkładu składowej poziomej naprężenia w gruncie dokonywano podczas badania statycznego obciążenia pala, przy którym rejestrowano również siłę przyłożoną w głowicy, opór podstawy oraz osiadanie. Wyniki zmiany składowej poziomej naprężenia w gruncie wraz ze średnimi naprężeniami stycznymi na pobocznicy wynikającymi z jej oporu w zależności od osiadania pala przedstawiono na rys. 30.



Rys. 30. Wyniki pomiaru zmiany składowej poziomej naprężenia w gruncie przy pobocznicy pala P14 (lewa oś) oraz składowej stycznej (prawa oś) w odniesieniu do osiadania

Można zauważyć, że wykresy przyrostu składowej stycznej naprężenia na pobocznicy oraz składowej poziomej naprężenia w gruncie są w przybliżeniu jednokładne. Nie oznacza to jednak, że zmiana składowej poziomej spowodowana jest wyłącznie oddziaływaniem oporu pobocznicy pala. Wcześniejsze badania wskazują, że stan naprężenia powyżej poziomu podstawy pala jest pod znacznym jej wpływem, co może powodować powstanie dodatkowych docisków gruntu do pobocznicy. Zaobserwowano to w badaniach w postaci wzrostu składowej poziomej naprężenia w gruncie pomimo osiągnięcia maksymalnego oporu pobocznicy pala. Zmiana składowej poziomej naprężenia w gruncie w stosunku do składowej stycznej wynikającej z oporu pobocznicy pala jest początkowo w przybliżeniu liniowa (rys. 31).



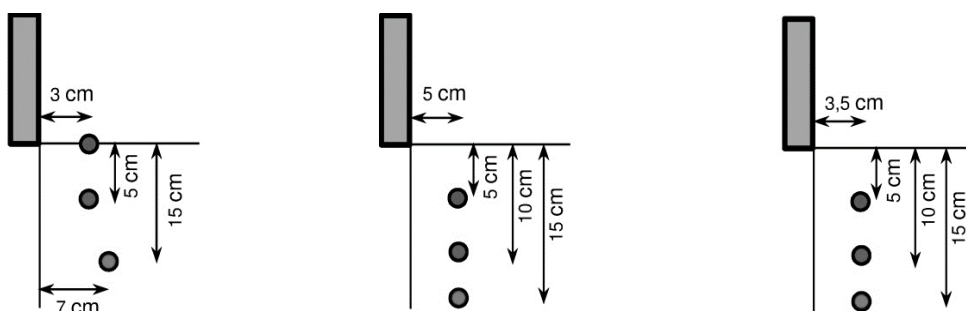
Rys. 31. Zmiana składowej poziomej naprężenia w gruncie w stosunku do składowej stycznej na pobocznicach pali P14, P15 i P18

Maksymalne opory pobocznic pali P14, P15 i P18 wynosiły odpowiednio 0,44 kN, 0,19 kN i 0,36 kN, a współczynniki kierunkowe linii aproksymujących – 3,16, 1,82 i 2,49. Oznacza to, że im szybsza jest mobilizacja naprężeń poziomych w gruncie, tym większy jest ostateczny maksymalny opór pobocznic pała.

Podsumowując, obciążenie pała w głowicy powoduje zmianę stanu naprężenia w gruncie w wyniku przekazania siły z pała z podłoża gruntowego poprzez opór pobocznic i podstawy pała. Opory graniczne, jakie są wówczas osiągnane, nie odnoszą się zatem do naprężeń geostatycznych, lecz do tych wartości, jakie obserwuje się przy zniszczeniu, tj. po przyroście zarówno składowej pionowej, jak i poziomej naprężenia w gruncie. Stan graniczny nośności gruntu odnosi się do jego wytrzymałości wynikającej nie tylko z parametrów geotechnicznych, ale również ze stanu naprężenia. Poznanie zmiany stanu naprężenia w gruncie spowodowanej obciążeniem pała w głowicy jest kluczowe w poprawnej interpretacji zjawiska jego współpracy z gruntem i mechanizmów przekazywania obciążenia z głowicy poprzez trzon i podstawę do podłoża gruntowego.

4.3. Badania przemieszczeń gruntu przy wciskaniu pala z wykorzystaniem reperów pomiarowych

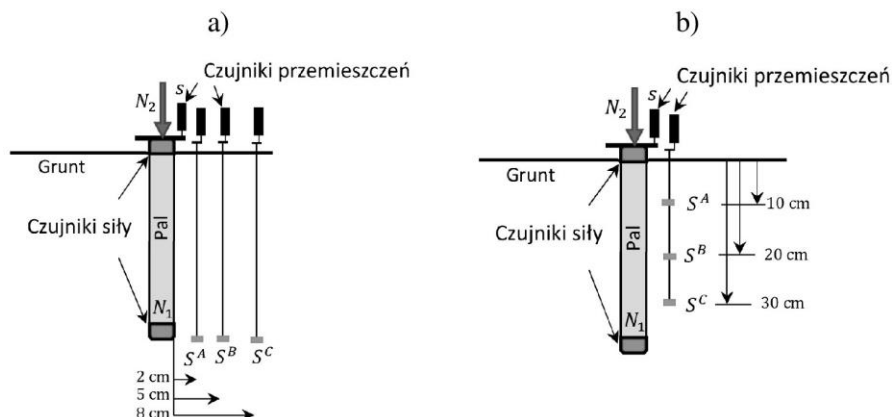
Przekazywanie obciążenia z pala do podłoża gruntowego oprócz zmiany stanu naprężenia powoduje również deformację przestrzeni gruntowej. Zastosowano repery, które pozwalały na badanie przemieszczeń w gruncie poprzez pomiar wysuwu pręta z utwierdzoną w gruncie bazą. Badania wykonywano w różnych schematach różniących się lokalizacją punktów pomiarowych. Badania w schematach przedstawionych na rys. 32 szczegółowo opisano we wcześniejszej pracy (Żarkiewicz, 2019b).



Rys. 32. Schematy lokalizacji punktów pomiarowych przemieszczeń pionowych gruntu podczas próbnych obciążeń statycznych (Żarkiewicz, 2019b)

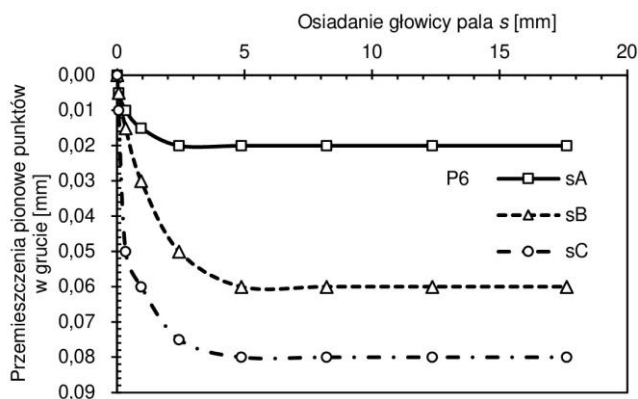
Wykazano, że przemieszczenia w analizowanych punktach różnią się od siebie. Zmiany przemieszczeń w stosunku do osiadania pozwoliły na określenie geometrii strefy przemieszczeń pionowych spowodowanych wciskaniem pala. Ponadto stwierdzono, że punkt znajdujący się w poziomie podstawy pala jest początkowo przemieszczany w dół, lecz kierunek ten odwraca się przy obciążeniu bliskim granicznemu. Jest to kolejny dowód na to, że podstawa pala oddziałuje również powyżej poziomu podstawy.

Następnie przeprowadzono kolejne badania w schemacie przedstawionym na rys. 33 w celu sprawdzenia, jak daleko od pobocznicy pala sięga wpływ podstawy oraz czy przemieszczenia wokół pobocznicy na jednakowej odległości są takie same.



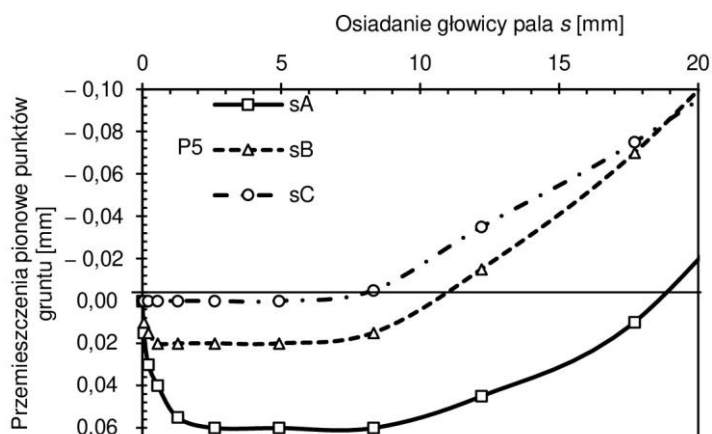
Rys. 33. Schematy lokalizacji punktów pomiarowych przemieszczeń pionowych gruntu podczas próbnych obciążeń statycznych pali: a) pal P5; b) pal P6

Zmiany przemieszczeń pionowych gruntu przy poboczniczy pala przedstawiono na rys. 34. W badaniu pala P5 wyraźnie można zaobserwować, że przemieszczenia gruntu różnią się od siebie i są większe na znacznie większych głębokościach. Ponadto przemieszczenia mają tendencję do stabilizacji. Oznacza to, że są spowodowane przez ugięcie przestrzeni gruntowej, które jest maksymalne przy wystąpieniu poślizgu gruntu po poboczniczy. Wówczas wraz z rosnącym osiadaniem i dalszą mobilizacją oporu podstawy pala grunt wokół poboczniczy nie ulega dalszym przemieszczaniom.



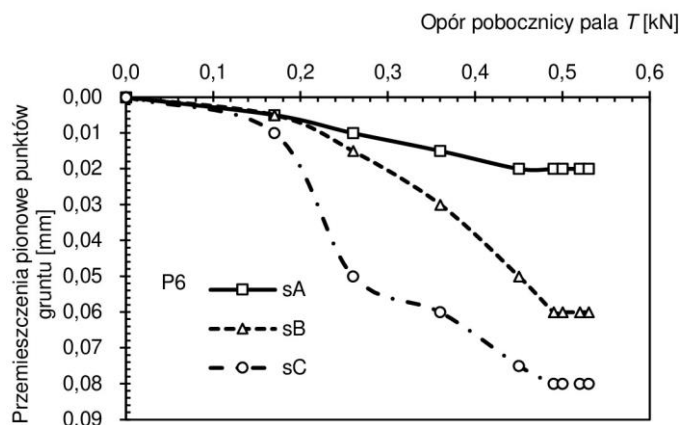
Rys. 34. Przemieszczenia pionowe badanych punktów pomiarowych wokół poboczniczy na różnych poziomach w stosunku do osiadania głowicy pala (schemat rys. 30b)

W badaniach przemieszczeń pionowych w schemacie przedstawionym na rys. 33a wraz z wciskaniem pala zaobserwowano ugięcie przestrzeni gruntowej, którego intensywność maleje wraz z odległością od poboczniczy. Na rys. 35 przedstawiono zależność przemieszczeń pionowych w stosunku do osiadania pala. Analiza wykazała, że po osiągnięciu stabilizacji przemieszczeń pionowych następuje zmiana ich kierunku i dalsze obciążenie pala powoduje przemieszczenie gruntu ku górze.

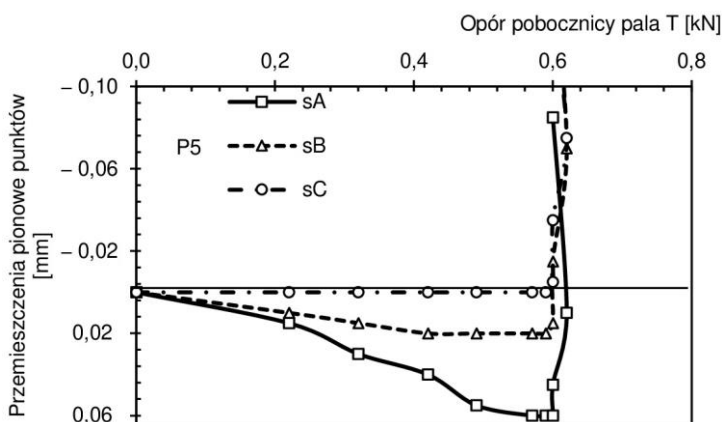


Rys. 35. Przemieszczenia pionowe badanych punktów pomiarowych wokół poboczniczy na różnych odległościach od pala w stosunku do osiadania głowicy (schemat rys. 30a)

Przemieszczenia wybranych punktów w relacji do oporu poboczniczy pala pokazano na rys. 36 i 37. Na pierwszym z nich przedstawiono pomiary punktów znajdujących się na różnych głębokościach w odległości 2 cm od poboczniczy pala (rys. 33b). Zależność przemieszczenia gruntu przy poboczniczy pala od jej oporu jest w przybliżeniu liniowa, aż do osiągnięcia maksymalnych wartości. Poziome odcinki przy końcu badania wskazują na dalszy nieznaczny wzrost oporu poboczniczy przy braku ugięcia przestrzeni gruntowej. Zjawisko to można wytłumaczyć tym, że poślizg gruntu po poboczniczy pala nie występuje jednocześnie w każdym jej punkcie, lecz jest osiągany początkowo lokalnie, a następnie na całej powierzchni.



Rys. 36. Przemieszczenia pionowe badanych punktów pomiarowych wokół poboczniczy pala P6 na różnych głębokościach, lecz tej samej odległości w stosunku do osiadania głowicy (schemat rys. 33b)

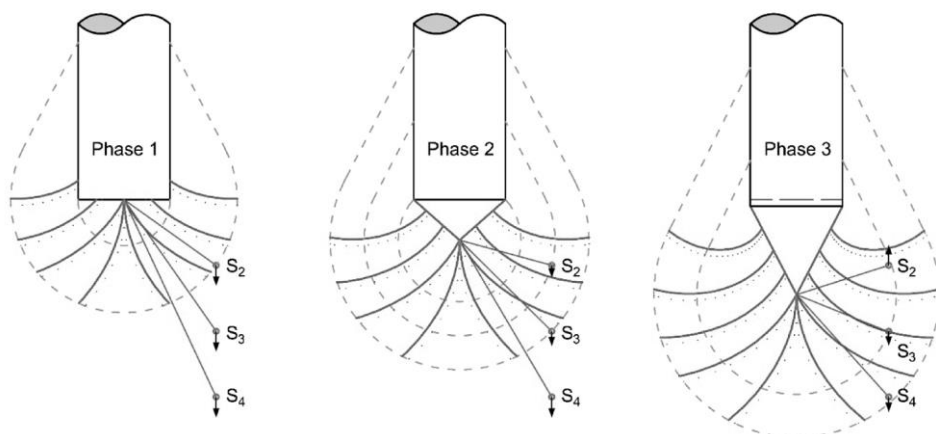


Rys. 37. Przemieszczenia pionowe badanych punktów pomiarowych wokół poboczniczy pala P5 na różnych odległościach od poboczniczy, lecz na tym samym poziomie w stosunku do osiadania głowicy (schemat rys. 33a)

Na poziomie podstawy zaobserwowano w przybliżeniu podobną liniową zależność ugięcia przestrzeni gruntowej od oporu poboczniczy pala. W tym przypadku reperry zostały umieszczone na jednakowej głębokości, ale w różnych odległościach od poboczniczy pala. W ten sposób możliwe było określenie zasięgu ugięcia przestrzeni gruntowej. Przemieszczenia pionowe były tym intensywniejsze, im bliżej poboczniczy pala znajdowały się punkty pomiarowe, a w odległości

8 cm (2,85D) nie obserwowano już żadnych przemieszczeń. Dopiero przy zbliżeniu do maksymalnego oporu poboczniczy pala przemieszczenia pionowe stabilizowały się. Należy ponadto zauważyć, że po osiągnięciu maksymalnego oporu poboczniczy zwrot przemieszczeń pionowych w gruncie zmienił się i dalsze obciążanie pala powodowało wypieranie gruntu ku górze (rys. 37).

Przemieszczenie pionowe trzonu pala powoduje deformacje w podłożu gruntowym. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że osiadanie pala jest przyczyną ugięcia przestrzeni gruntowej, które rośnie aż do osiągnięcia poślizgu gruntu po poboczniczy. Wówczas dalsze wciskanie pala skutkuje już tylko odkształceniami plastycznymi w bliskim sąsiedztwie poboczniczy.



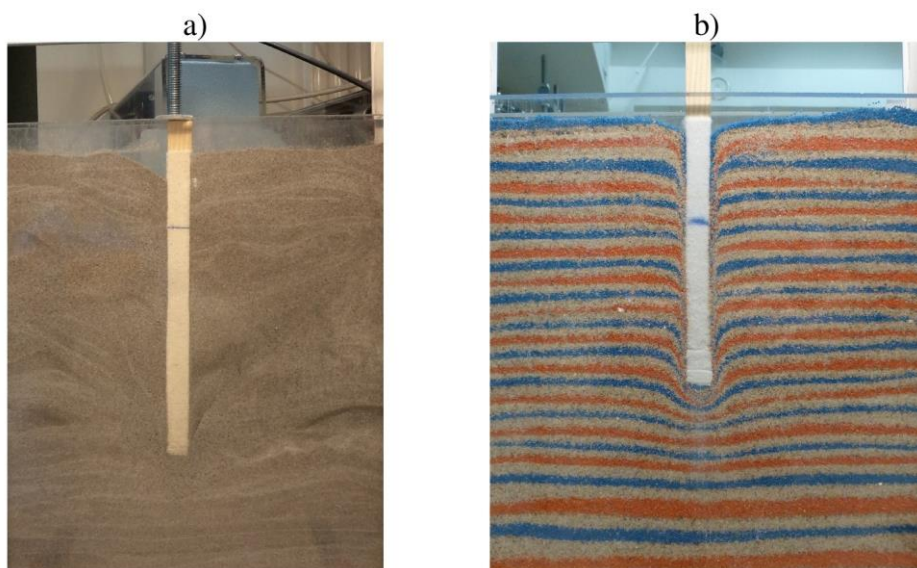
Rys. 38. Schemat formowania się strefy przemieszczeń przy podstawie pala (Żarkiewicz, 2019b)

Odnosząc się do oddziaływania podstawy pala, w wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że przemieszczenia gruntu pod podstawą również można podzielić na trzy fazy (rys. 38). Pierwsza dotyczy małych osiadań, mniejszych od $0,01D$ – $0,02D$, przy których dochodzi do ugięcia przestrzeni gruntowej poniżej poziomu podstawy pala. W drugiej fazie mobilizuje się strefa gruntu uplastycznionego pod podstawą pala, przyjmująca kształt gruszki. W tej fazie przemieszczenia gruntu rozchodzą się od środka strefy gruntu uplastycznionego,

który zlokalizowany jest poniżej podstawy pala. W trzeciej fazie grunt wokół pala, znajdujący się powyżej środka strefy gruntu uplastycznionego, przemieszczany jest również ku górze. W tej fazie obserwuje się znaczne przyrosty osiadania pala w kolejnych stopniach obciążenia z uwagi na osiągnięcie oporu podstawy bliskiego wartości granicznej.

4.4. Fotogrametryczne badania przemieszczeń gruntu wokół pala

Przedstawione w podrozdziałach 4.2 i 4.4 badania eksperymentalne, które prowadzono po uzyskaniu stopnia naukowego doktora, nawiązują do jakościowych badań fotogrametrycznych zrealizowanych również w ramach rozprawy doktorskiej, które miały na celu przedstawienie przemieszczenia gruntu przy wciskaniu pala. W tym celu przygotowano model zbudowany z komory prostopadłościennej o wymiarach $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, w którym umieszczano pal o szerokości 10 mm. Ściany komory były wykonane z przezroczystych szyb PLEXI o grubości 5 mm. Stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 39.

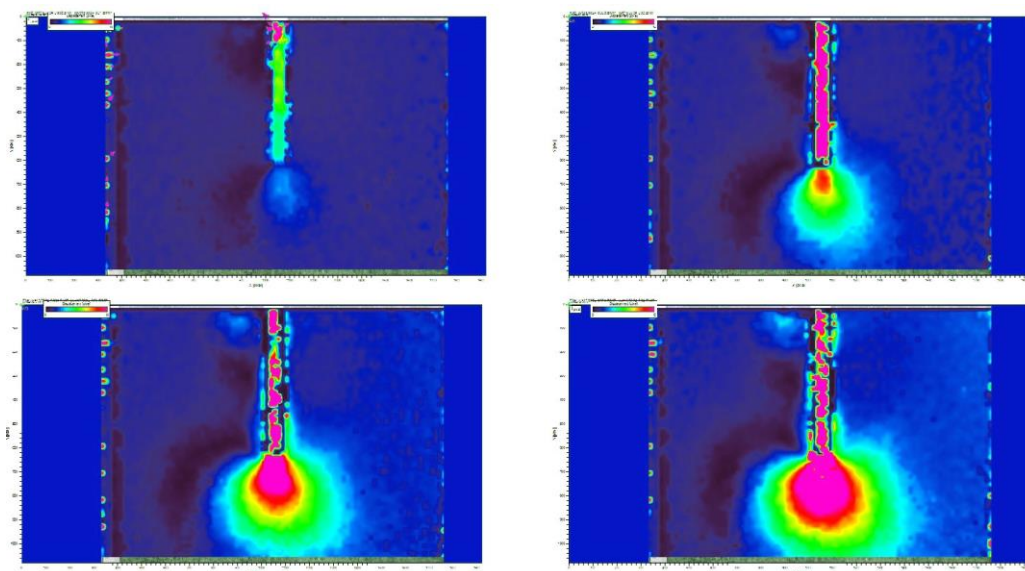


Rys. 39. Stanowisko badawcze do fotogrametrycznych pomiarów przemieszczeń gruntu przy wciskaniu pala: a) grunt niespoisty jednorodny; b) piasek barwiony ułożony warstwowo

Badania polegały na wciskaniu pala z jednoczesną rejestracją przemieszczeń za pomocą zdjęć poklatkowych. W badaniach zastosowano grunty niespoiste naturalne (rys. 39a) lub sztucznie barwione (rys. 39b).

Wykonanie modelu w warstwach różniących się kolorami było korzystne jedynie do wizualnego uchwycenia, jak wciskanie pala wpłynęło na ostateczną deformację gruntu. Z uwagi na ograniczoną percepcję wzrokową określenie deformacji gruntu jednorodnego było bardzo utrudnione. Niemniej jednak analiza fotogrametryczna zdjęć poklatkowych za pomocą programu PIV.LAB4 wskazała, że kolor ziaren gruntu nie wpływał na wynik. W związku z tym badania przewidziane do analizy fotogrametrycznej prowadzono wyłącznie na gruncie jednorodnym.

Przedstawione na rys. 40 wyniki analizy fotogrametrycznej ukazują zmiany deformacji gruntu w relacji do stanu początkowego. Kolor różowy określa największe wartości przemieszczeń (długości wektorów przemieszczeń).



Rys. 40. Wizualizacja przemieszczeń gruntu przy wciskaniu pala

Ze zdjęć poklatkowych przygotowano filmy, które po dużym przyspieszeniu mogły być podstawą interpretacji wizualnej. Można było dostrzec, że w trakcie wciskania pala występowały dwie fazy:

1. Pierwsza faza – dotycząca początku procesu wciskania, kiedy wyraźnie widoczne jest ugięcie przestrzeni gruntowej w otoczeniu pala i pod jego podstawą.
2. Druga faza – w której widoczny był wyraźny poślizg gruntu po pobocznicę i brak postępu uginania przestrzeni gruntowej. Ponadto można było zaobserwować dalszy wzrost strefy odkształceń pod podstawą pala, a także strefy gruntu, które są przemieszczane ku górze spod podstawy.

Badania fotogrametryczne i ich analiza były motywacją do podjęcia badań ilościowych zrealizowanych po uzyskaniu stopnia naukowego doktora i przedstawionych w niniejszej pracy.

5. Zastosowanie praktyczne otrzymanych wyników badań

5.1. Badania terenowe próbnych obciążeń statycznych pali

Celem stosowania pali jest nie tylko przenoszenie obciążeń na głębsze i sztywniejsze warstwy podłoża gruntowego, ale również wykorzystanie wytrzymałości gruntów słabonośnych przez opór pobocznic występujący na trzonie pala. W powszechnie stosowanej metodzie nośność pala obliczana jest na podstawie granicznych wartości oporu podstawy i pobocznic. Obliczeniową wartość nośności pala określa się za pomocą współczynnika bezpieczeństwa, który obejmuje niedoskonałości metod projektowania, niewłaściwe założenia projektowe oraz niedokładności w technologii. Bardzo często pale stosuje się w złożonych lub skomplikowanych warunkach geotechnicznych oraz przy bardzo odpowiedzialnej inwestycji. Dokładne metody projektowania i weryfikacji są wówczas niezbędne. Błędy w projekcie posadowienia budynku mogą doprowadzić do katastrofy lub bardzo poważnych awarii. Aby tego uniknąć, zaleca się przeprowadzenie weryfikacji. Najbardziej znaną i cenioną metodą weryfikacji jest próba statycznego obciążenia pala. W projektowaniu pali bardzo ważna jest zarówno nośność graniczna, jak i osiadanie odpowiadające projektowej nośności. W przypadku odniesienia współczynnika bezpieczeństwa wyłącznie do nośności granicznej pala może się okazać, że osiadanie przekracza wartość dopuszczalną. Sytuację taką zaprezentowano na rys. 41, na którym przedstawiono krzywe osiadania dwóch pali o jednakowej nośności granicznej określonej przez asymptotę poziomą w metodzie M-K.

W analizie krzywej osiadania metodą M-K głównym parametrem decydującym o krzywiznie krzywej osiadania jest κ_2 . We wcześniejszej pracy opisano propozycję metody określania nośności pala z uwzględnieniem charakterystyki krzywej osiadania pala (Żarkiewicz, 2019c). W metodzie tej należy wyznaczyć pochodną funkcji aproksymującej M-K, która wynosi (29):

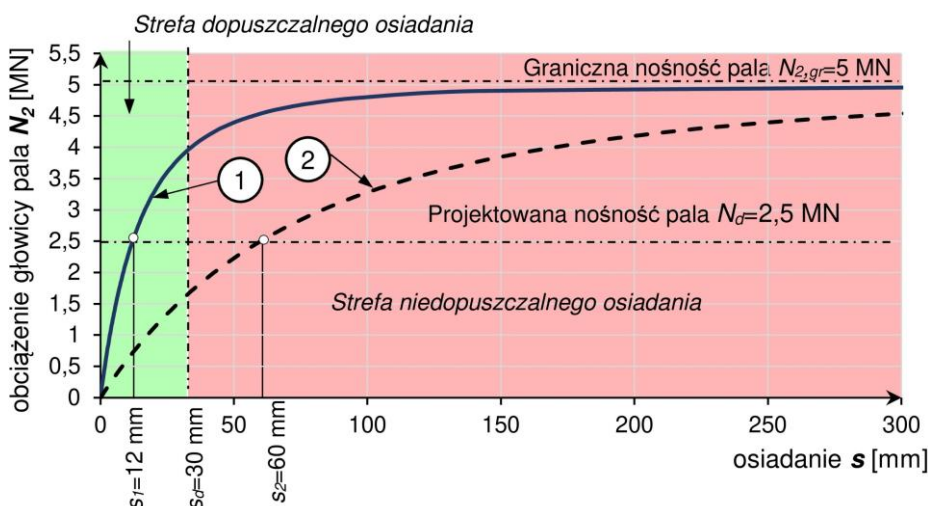
$$N_2' = \frac{1}{c_2} \left(1 + \frac{\kappa_2 s}{c_2 N_{2,gr}} \right)^{-1 - \frac{1}{\kappa_2}} \quad (29)$$

Druga pochodna wynosi (30).

$$N_2'' = -\frac{1}{c_2 N_{2,gr}} (\kappa_2 + 1) \left(1 + \frac{N_2}{N_{2,gr}} \right)^{\kappa_2} \quad (30)$$

Wówczas styczna do pochodnej funkcji M-K w stosunku do obciążenia pała jest opisana równaniem (31).

$$N_2'(N_2) = N_2''(0)N_2 + N_2'(0) = -\frac{1}{c_2 N_{2,gr}} (\kappa_2 + 1)N_2 + \frac{1}{c_2} \quad (31)$$



Rys. 41. Dwie różne krzywe osiadania pały, których nośność graniczna określona asymptotą poziomą w metodzie M-K jest taka sama: s_1 , s_2 – osiadanie pały przy projektowanym obciążeniu odpowiednio pały nr 1 i nr 2 (Żarkiewicz, 2019c)

W zaproponowanej metodzie projektowana nośność pały odpowiada przecięciu stycznej z osią poziomą. Wówczas projektowana nośność pały wynosi (32).

$$N_2'(N_2) = 0 \rightarrow N_{2,p} = \frac{N_{gr,2}}{\kappa_2 + 1,4} \quad (32)$$

gdzie:

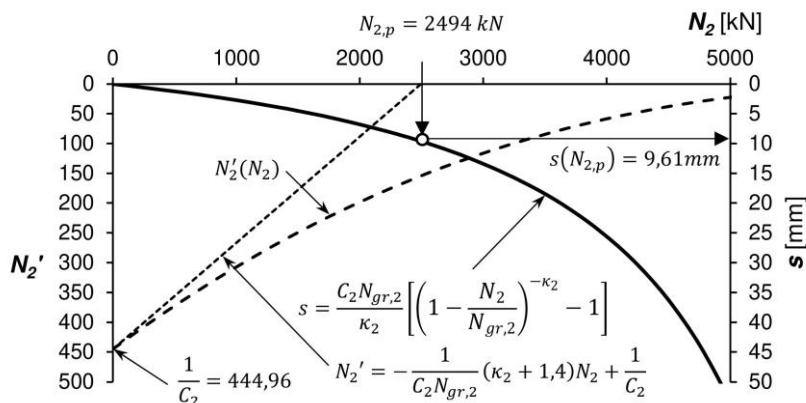
$N_{2,p}$ – projektowana nośność pały [kN].

Jako przykład do analizy wybrano pał wykonany w rejonie Szczecina w technologii Tubex. Długość i średnica pała wynoszą odpowiednio 21 m oraz 0,56 m. Pał był następnie próbnie obciążany statycznie. Z pierwszego cyklu obciążenia uzyskano pary punktów $\{N_{2i}; s_i\}$ (tabela 3).

Tabela 3. Wyniki próbnego obciążenia statycznego pała

N_{2i} [kN]	0	173	345	518	690	863	1035	1208	1380
s_i [mm]	0	0,43	0,83	1,27	1,78	2,3	2,85	3,42	4,04

Po aproksymacji zbioru przedstawionego w tabeli 3 metodą M-K otrzymano następujące parametry krzywej M-K: $N_{2,gr} = 7053$ kN, $C_2 = 0,00225$ mm/kN, $\kappa_2 = 1,428$. Następnie przy wykorzystaniu wzorów (31–34) otrzymano współczynnik bezpieczeństwa $FS = 2,83$, nośność projektowaną pała $N_{2,p} = 2494$ kN oraz odpowiadające jej osiadania głowicy pała $s(N_{2,p}) = 9,61$ mm. Graficzną interpretację tej metody przedstawiono na rys. 42.



Rys. 42. Metoda określenia nośności pała na podstawie wyników próbnego obciążenia i metody M-K (Żarkiewicz, 2019c)

Równania określone w rozprawie doktorskiej pozwalają na określenie parametrów krzywej oporu podstawy pała przy użyciu metody M-K opisującej krzywą osiadania. Wykorzystując tę metodę, ustalono, że graniczny opór pod-

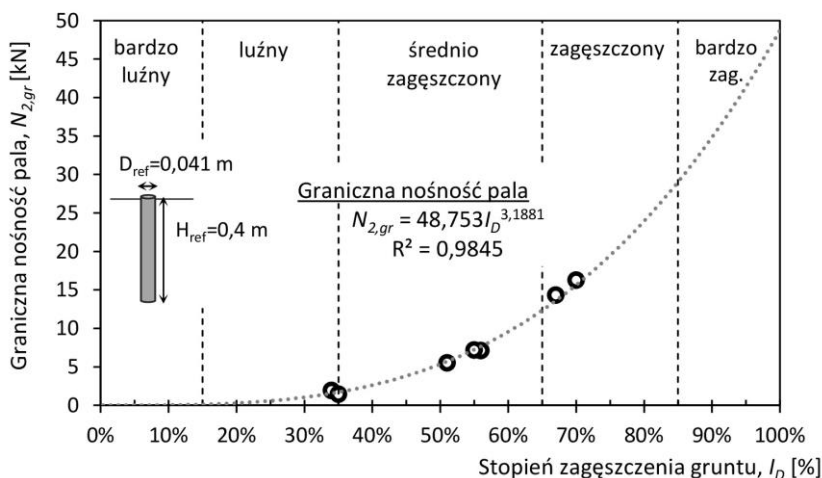
stawy pala wynosi 4126 kN, a maksymalny opór poboczniczy 2783 kN. Można zatem obliczyć, że w stanie granicznym udział poboczniczy w przekazywaniu obciążenia wynosi 39%. Znajomość formowania się oporów poboczniczy i podstawy pala wraz z osiadaniem umożliwia sprawdzenie rozdziału oporów na podstawę i pobocznice w dowolnym stopniu obciążenia pala. Wówczas przy projektowanej nośności pala równej 2494 kN i osiadaniu równym 9,61 mm opór poboczniczy wynosi 1357 kN, a opór podstawy 1137 kN. Oznacza to, że w warunkach eksploatacyjnych przy projektowanej nośności pala pobocznica przejmuje 54% obciążenia przyłożonego w głowicy pala.

5.2. Badania pali drukowanych w technologii druku 3D

Technologia przyrostowego wykonywania konstrukcji, zwana również drukiem 3D, jest przedmiotem wielu prac naukowych (Kaszyńska i in., 2018; Walsh, 2019; Carneau i in., 2020). Obecnie technologie te pozwalają na wykonanie bryły budynku na wcześniej przygotowanych fundamentach. Hoffmann i in. (2021) przedstawili metodę wykonania pali przy wykorzystaniu urządzeń przeznaczonych do przyrostowego wykonywania konstrukcji wraz z analizą nośności wykonanych pali i efektywności fundamentu palowego. Pale wykonane w technologii druku 3D są technologicznie zbliżone do przemieszczeniowych pali wkręcanych. Korzyścią z wykorzystania druku 3D do wytworzenia pali jest możliwość wykonania całej bryły budynku wraz z fundamentami bez zmiany technologii. Z uwagi na dość lekką konstrukcję drukarki 3D pale wykonane w tej technologii mają niewielką średnicę oraz długość, w zależności od warunków gruntowo-wodnych, od 0,4 m do 3 m. Szczegóły procesu drukowania, pomiaru geometrii pali oraz aspekty materiałowe opisali Hoffmann i in. (2021).

W badaniach nośności pali drukowanych przebadano pale o średnicy 4,1 cm i zagłębieniu w gruncie 40 cm przy różnym zagęszczeniu ośrodka gruntowego. Z każdego badania statycznego obciążenia otrzymano zbiory danych $\{N_{2i}; s_i\}$,

które następnie były podstawą do aproksymacji metodą M-K. Wyniki otrzymanych nośności granicznych pali w metodzie M-K przedstawiono na rys. 43.



Rys. 43. Graniczna nośność pala w zależności od stopnia obciążenia (Hoffmann i in., 2021)

Otrzymano wówczas równania pozwalające na określenie parametrów M-K w zależności od zagęszczenia gruntu (33–35).

$$N_{2,gr} = 48,753 I_D^{3,1881} \quad (33)$$

$$\kappa_2 = 1,2327 \exp\left(-\frac{0,306}{I_D}\right) \quad (34)$$

$$C_2 = 0,1162 I_D^{-2,804} \quad (35)$$

gdzie: I_D – stopień zagęszczenia gruntu niespoistego [–].

W tych wstępnych badaniach nie odnoszono się do wpływu uziarnienia gruntu na otrzymane zależności. Przy znajomości parametrów krzywej osiadania pala $N_{2,gr}$, C_2 oraz κ_2 i uwzględnieniu wcześniej wyznaczonych zależności (Żarkiewicz, 2017) istnieje możliwość określenia parametrów $N_{2,gr}$, C_1 oraz κ_1 . W ten sposób można obliczyć rozkład oporu na pobocznice i podstawę pala. W przypadku zmiany geometrii pala drukowanego możliwe jest określenie para-

metrów krzywej oporu podstawy pała z następujących równań (36–38), w których znane są wartości referencyjne parametrów określone z krzywej osiadania pała oraz równań (35–37).

$$C_1 = C_{1,ref} \frac{D_{ref}}{D} \quad (36)$$

$$N_{1,gr} = N_{1,gr,ref} \left(\frac{D}{D_{ref}} \right)^2 \quad (37)$$

$$\kappa_2 = 2,14 \left(\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} - 1 \right) \quad (38)$$

gdzie:

D_{ref} – średnica referencyjna pała [m].

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że zastosowanie pali wykonanych w technologii druku 3D poprawia stabilność fundamentu w stosunku do standardowych ław fundamentowych, ponadto pozwala na redukcję robót ziemnych oraz oszczędność związaną z mniejszym zużyciem betonu. Z uwagi na lekką konstrukcję urządzenia do przyrostowego wykonania konstrukcji budynku, która ma niską wytrzymałość, wykonanie pali w tej technologii ogranicza się jedynie do małych średnic wynoszących zaledwie 4–6 cm i długości do 2–3 m. Kolejnym ograniczeniem może być występowanie gruntów bardzo gruboziarnistych lub nasypów niebudowlanych zawierających gruz. Czynniki te mogą całkowicie wykluczyć zastosowanie technologii druku 3D do wykonania pali i spowodować konieczność zastosowania ciężkiego sprzętu. Przedstawiona technologia i adekwatne do niej metody projektowe wymagają rozwoju i wykonania kolejnych badań.

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono problematykę współpracy pala obciążanego osiowo statycznie z podłożem gruntowym. Zagadnienie to analizowano w kontekście formowania się oporów pobocznic i podstawy pala wraz z osiadaniem. Badania eksperymentalne wykonywano w warunkach laboratoryjnych na palach o zmniejszonej geometrii w stosunku do pali terenowych. Prowadzenie badań w takiej skali umożliwiło zaobserwowanie zjawisk fizycznych, jakie zachodzą w gruncie wokół pala wciskanego, często bardzo trudnych do uchwycenia w warunkach terenowych. Zastosowano dodatkowe instrumenty pomiarowe umożliwiające pomiar takich wielkości, jak: opór podstawy pala, osiadanie głowicy pala, przemieszczenia pionowe gruntu, składowa pionowa lub pozioma naprężenia w gruncie.

Jako podstawowy schemat w badaniach przyjęto pojedynczy pal, który osiada pod wpływem obciążenia w głowicy, i grunt, który przemieszcza się pod wpływem mobilizacji oporu pobocznic i podstawy pala. Przeprowadzone badania rozdziału oporu na pobocznice i podstawę wskazują, że opór tej pierwszej ma duże znaczenie w kształtowaniu całkowitego oporu pala z uwagi na jego szybką mobilizację wraz z osiadaniem. Mobilizacja oporu podstawy jest mniej intensywna w relacji do osiadania pala, pomimo iż wartość graniczna oporu podstawy jest większa niż graniczny opór pobocznic. W badaniach potwierdzono ponadto, że opór pobocznic dąży do wartości maksymalnej, przy której dochodzi do poślizgu gruntu po pobocznicach pala. Wówczas opór pobocznic nie wzrasta w stosunku do rosnącego obciążenia pala. Nie oznacza to jednak, że pal osiąga graniczną wartość nośności, ponieważ zwiększające się obciążenie może być wciąż przekazywane przez rosnący opór podstawy pala.

Kolejne badania dotyczyły zmian składowej pionowej lub poziomej naprężenia w gruncie wywołanych obciążeniem głowicy pala. Zmiana tego para-

metru spowodowana oddziaływaniem poboczniczy pala jest znaczna. Oznacza to, że graniczny opór poboczniczy pala odnosi się do zmienionego, w stosunku do początkowego, stanu naprężenia. Na głębokości równej połowie zagłębienia pala wpływ na rozkład składowej pionowej naprężenia w gruncie ma wyłącznie pobocznica. Jednak na głębokości równej zagłębieniu podstawy zaobserwowano, że składowa pionowa naprężenia w gruncie zależy zarówno od oporu poboczniczy, jak i podstawy. Oznacza to, że naprężenia wywołane oporem podstawy pala mogą być przekazywane powyżej poziomu podstawy.

W badaniach pionowych przemieszczeń gruntu potwierdzono zjawisko ugięcia przestrzeni gruntowej spowodowane osiadaniem pala. Określono zasięg przemieszczeń pionowych gruntu przy podstawie pala. Ważną obserwacją badań było zjawisko zmiany zwrotu przemieszczeń, która zauważalna było najwyraźniej przy znacznych osiadaniach i oporach bliskich wartości granicznej. Zjawisko to odnotowywane pierwotnie w badaniach fotogrametrycznych zostało potwierdzone w przeprowadzonych badaniach ilościowych.

W pracy przedstawiono podejście analityczne interpretacji krzywej osiadania pala, mające na celu oszacowanie projektowanej nośności pala. W analizie tej uwzględniono nie tylko graniczną nośność pala, lecz również zależność obciążenie–osiadanie. Zaprezentowane metody oprzyrządowania pali były pomocne przy analizie współpracy pali z gruntem niespoistym wykonanych w technologii druku 3D.

Wnioski wyciągnięto na podstawie badań eksperymentalnych pali w warunkach laboratoryjnych w jednorodnym ośrodku gruntowym. Potwierdzenie zaobserwowanych zjawisk w palach terenowych w gruncie uwarstwionym wymaga dalszych badań.

Program dalszych badań przewiduje zbadanie wpływu technologii wykonania pala i uwarstwienia podłoża gruntowego na kształtowanie się mechanizmów formowania się oporu poboczniczy i podstawy pala.

7. Literatura

- Abd Elsamee W.N. (2012). Evaluation of the ultimate capacity of friction piles. *Engineering*, 4 (11), 778–789. DOI: 10.4236/eng.2012.411100.
- Abd Elsamee W.N. (2013). New method for prediction pile capacity executed by continuous flight auger (CFA). *Engineering*, 5 (4), 344–354. DOI: 10.4236/eng.2013.54047.
- Abdullah M.H., Taha M.R. (2013). A review of the effects of tunneling on adjacent piles. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 2739–2762.
- Arham M., Farooq K., Mujtaba H. (2017). Comparison of ultimate pile capacity based on theoretical and pile load test methods. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 20, 1–13. DOI: 10.1016/0022-5193(67)90079-3.
- Barrett J.W., Prendergast L.J. (2020). Empirical shaft resistance of driven piles penetrating weak rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53 (12), 5531–5543. DOI: 10.1007/s00603-020-02228-7.
- Bolton M.D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique*, 36 (1), 65–78. DOI: 10.1680/geot.1986.36.1.65.
- Buda-Ożóg L., Zięba J., Sieńkowska K., Nykiel D., Zuziak K., Sieńko R., Bednarski Ł. (2022). Distributed fibre optic sensing: Reinforcement yielding strains and crack detection in concrete slab during column failure simulation. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 195. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111192.
- Carneau P., Mesnil R., Roussel N., Baverel O. (2020). Additive manufacturing of cantilever – From masonry to concrete 3D printing. *Automation in Construction*, 116. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103184.
- Chan D., Madabhushi G., Deng C., Haigh S.K. (2019). *Calibration of tactile pressure sensing mats for static geotechnical centrifuge applications*. Apollo – University of Cambridge Repository. DOI: 10.17863/CAM.47793.
- Chen H., Li L., Li J., Sun D. (2022). A rigorous elastoplastic load-transfer model for axially loaded pile installed in saturated modified Cam-clay soils. *Acta Geotechnica*, 17 (2), 635–651. DOI: 10.1007/s11440-021-01248-z.
- Cui Y.L., Qi C.G., Zheng J.H., Wang X.G., Zhang S.M. (2021). Field test research on post-grouting effect for super-long cast-in-place bored pile in thick soft foundation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 3, 4833–4842. DOI: 10.1007/s10706-021-01796-x.
- Dembicki E. (red.) (1988). *Fundamentowanie. Projektowanie i wykonawstwo*. Warszawa: Arkady.

- Dijkstra J., Anaraki K.E., Broere W., van Tol F. (2009). Numerical simulation of pile installation in sand. *Computational Geomechanics, COMGEO I – Proceedings of the 1st International Symposium on Computational Geomechanics*, 753–762.
- Dijkstra J., Broere W. (2010). Full-field stress and strain measurements during pile installation. *Physical Modelling in Geotechnics – Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, 2, 745–750. DOI: 10.1201/b10554-122.
- Dijkstra J., Broere W., van Tol A.F. (2006). Experimental investigation into the stress and strain development around a displacement pile. *Proceedings of the Tenth International Conference on Piling and Deep Foundations*, 252–259.
- El-Sekelly W., Abdoun T., Dobry R. (2015). Effect of overconsolidation on K₀ in centrifuge models using CPT and tactile pressure sensor. *Geotechnical Testing Journal*, 38 (2), 150–165. DOI: 10.1520/GTJ20140101.
- Engin H.K. (2013). *Modelling pile installation effects. A numerical approach*. Ankara: Middle East Technical University.
- Fellenius B.H. (2023). *Basics of foundation design*. Pobrano z: <https://www.fellenius.net/papers/428%20The%20Red%20Book,%20Basics%20of%20Foundation%20Design%202023.pdf> (dostęp: 28.05.2023).
- Ganju E., Han F., Prezzi M., Salgado R., Pereira J.S. (2020). Quantification of displacement and particle crushing around a penetrometer tip. *Geoscience Frontiers*, 11 (2), 389–399. DOI: 10.1016/j.gsf.2019.05.007.
- Gao Y., Wang Y.H. (2013). Calibration of tactile pressure sensors for measuring stress in soils. *Geotechnical Testing Journal*, 36 (4). DOI: 10.1520/GTJ20120143.
- Glisic B., Inaudi D., Nan C. (2002). Pile monitoring with fiber optic sensors during axial compression, pullout, and flexure tests. *Transportation Research Record*, 1808, 11–20. DOI: 10.3141/1808-02.
- Gwizdała K. (2010). *Fundamenty palowe*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Han F., Salgado R., Prezzi M. (2018). Numerical and experimental study of axially loaded non-displacement piles in sand. *International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement*, 221–229.
- Hoffmann M., Żarkiewicz K., Zieliński A., Skibicki S., Marchewska Ł. (2021). Foundation piles – A new feature for concrete 3D printers. *Materials*, 14 (10), 2545. DOI: 10.3390/MA14102545.
- Hsu S., Ying C., Zhao F. (2014). The nature of friction: A critical assessment. *Friction*, 2 (1), 1–26. DOI: 10.1007/s40544-013-0033-z.
- Huynh V.H., Nguyen T., Nguyen D.P., Nguyen T.S., Nguyen T.C. (2022). A novel direct SPT method to accurately estimate ultimate axial bearing capacity of bored PHC

- nodular piles with 81 case studies in Vietnam. *Soils and Foundations*, 62 (4), 101163. DOI: 10.1016/j.sandf.2022.101163.
- Jardine R.J., Zhu B., Foray P., Dalton C.P. (2009). Experimental arrangements for investigation of soil stresses developed around a displacement pile. *Soils and Foundations*, 49 (5), 661–673. DOI: 10.3208/sandf.49.661.
- Jesswein M., Liu J. (2022a). Science direct using a genetic algorithm to develop a pile design method. *Soils and Foundations*, 62 (4), 101175. DOI: 10.1016/j.sandf.2022.101175.
- Jesswein M., Liu J. (2022b). Using a genetic algorithm to develop a pile design method. *Soils and Foundations*, 62 (4), 101175. DOI: 10.1016/j.sandf.2022.101175.
- Kaszyńska M., Hoffmann M., Skibicki S., Zieliński A., Techman M., Olczyk N., Wróblewski T. (2018). Evaluation of suitability for 3D printing of high performance concretes. *MATEC Web of Conferences*, 163, 1–8. DOI: 10.1051/mateconf/201816301002.
- Kim D., Jeong S., Park J. (2020). Analysis on shaft resistance of the steel pipe prebored and precast piles based on field load-transfer curves and finite element method. *Soils and Foundations*, 60 (2), 478–495. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.03.011.
- Kraśński A., Sieńko R. (2010). Pomiar pionowego rozkładu siły w pału podczas testów statycznych. *56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZiTb*, 161–168.
- Lambe W.T., Whitman R.V. (1969). *Soil mechanics*. New York: Wiley.
- Lashkari A. (2012). A plasticity model for sand-structure interfaces. *Journal of Central South University of Technology*, 19 (4), 1098–1108. DOI: 10.1007/s11771-012-1115-1.
- Lastiasih Y., Sidi I.D. (2014). Reliability of estimation pile load capacity methods. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 46 (1), 1–16. DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2014.46.1.1.
- Lehane B.M., Liu Z., Bittar E., Nadim F., Lacasse S., Jardine R., Carotenuto P., Rattley M., Gavin K. (2020). A new “unified” CPT-based axial pile capacity design method for driven piles in sand. *Proceedings Fourth International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, 462–477. Pobrano z: <https://research.tudelft.nl/en/publications/a-new-unified-cpt-based-axial-pile-capacity-design-method-for-dri> (dostęp: 28.05.2023).
- Loukidis D., Salgado R. (2008). Analysis of the shaft resistance of non-displacement piles in sand. *Géotechnique*, 58 (4), 283–296. DOI: 10.1680/geot.2008.58.4.283.
- Ma H.L., Bao Y.R., Ma Y.F., Yao W.H., Yang B.L. (2021). Research on model tests of the additional stress in soil caused by pile loads. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 58 (4), 332–338. DOI: 10.1007/s11204-021-09746-8.
- Majmudar T.S., Behringer R.P. (2005). Contact force measurements and stress-induced anisotropy in granular materials. *Nature*, 435 (7045), 1079–1082. DOI: 10.1038/nature03805.

- Meyer Z. (2014). Static load tests, short series interpretation. *Studia Geotechnica et Mechanica*, XXXVI (2), 45–49. DOI: 10.2478/sgem-2014-0019.
- Meyer Z., Kowalów M. (2010). Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3. Pobrano z: https://imig.pl/pliki/artykuly/2014-3/2014-3_202-207_Meyer.pdf (dostęp: 28.05.2023).
- Meyer Z., Stachecki K. (2018). Static load test curve (Q–s) conversion in to pile of different size. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation*, 50 (2), 171–182. DOI: 10.2478/sggw-2018-0014.
- Meyer Z., Szmeczel G. (2018). Ocena możliwości wykorzystania próbnych obciążeń statycznych do ustalenia nośności pobocznicy i podstawy pala. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 220–224.
- Meyer Z., Żarkiewicz K. (2014). Określenie maksymalnych składowych stycznych naprężeń na pobocznicy pala podczas badania statycznego. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 217–221.
- Meyer Z., Żarkiewicz K. (2015). Optymalizacja równania nośności pala na podstawie laboratoryjnych badań modelowych. *XXII Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska*.
- Meyer Z., Żarkiewicz K. (2017). Mechanizm formowania się oporu pobocznicy przy podstawie pala określony na podstawie badań laboratoryjnych. *Inżynieria i Budownictwo*, 73, 263–265.
- Mo P.Q., Chen H., Yu H.S. (2021). Undrained cavity expansion in anisotropic soils with isotropic and frictional destructuration. *Acta Geotechnica*, 5. DOI: 10.1007/s11440-021-01412-5.
- Monsberger C.M., Lienhart W., Hayden M. (2020). Distributed fiber optic sensing along driven ductile piles: Design, sensor installation and monitoring benefits. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10 (4), 627–637. DOI: 10.1007/s13349-020-00406-3.
- Nakagama Y., Tamari Y., Yoshida H., Yamamoto M., Suzuki H. (2022). Numerical analysis on seismic behavior of soil around pile group by 3D effective stress finite element method. *Soils and Foundations*, 62 (2), 101123. DOI: 10.1016/j.sandf.2022.101123.
- Nasr A.M., Elhakim A.F., Amer M.I. (2022). Soil stiffness from back-analysis of pile load tests in Al Burrullus. *Ain Shams Engineering Journal*, 13 (6), 101784. DOI: 10.1016/j.asej.2022.101784.
- Peng S.Y., Ng C.W., Zheng G. (2014). The dilatant behaviour of sand-pile interface subjected to loading and stress relief. *Acta Geotechnica*, 9 (3), 425–437. DOI: 10.1007/s11440-013-0216-9.
- PN-EN ISO 22477-1 (2019). *Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania konstrukcyjnych elementów geotechnicznych. Część 1: Badania pali: statyczne badanie nośności poprzez ściskanie osiowe*.

- Sales M.M., Prezzi M., Salgado R., Choi Y.S., Lee J. (2017). Load-settlement behaviour of model pile groups in sand under vertical load. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23 (8), 1148–1163. DOI: 10.3846/13923730.2017.1396559.
- Salgado R., Bandini P., Karim A. (2000). Shear Strength and Stiffness of Silty Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126 (5), 451–462. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:5(451).
- De Sanctis L., Di Laora R., Garala T.K., Madabhushi S.P., Viggiani G.M., Fagnoli P. (2021). Centrifuge modelling of the behaviour of pile groups under vertical eccentric load. *Soils and Foundations*, 61 (2), 465–479. DOI: 10.1016/j.sandf.2021.01.006.
- Shirato M., Koseki J., Fukui J., Kimura Y. (2006). Effects of stress-dilatancy behavior of soil on load transfer hysteresis in soil-pile interaction. *Soils and Foundations*, 46 (3), 281–298. DOI: 10.3208/sandf.46.281.
- Siemaszko P., Meyer Z. (2019). Static load test curve analysis based on soil field investigations. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 67 (2), 329–337. DOI: 10.24425/bpas.2019.128607.
- Siemaszko P., Meyer Z. (2021). Analysis of the pile skin resistance formation. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 43 (4), 380–388. DOI: 10.2478/sgem-2021-0026.
- Sieńko R., Bednarski Ł., Kanty P., Howiacki T. (2019). Application of distributed optical fibre sensor for strain and temperature monitoring within continuous flight auger columns. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 221 (1). DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012006.
- Tessari A., Sasanakul I., Abdoun T. (2010). Advanced sensing in geotechnical centrifuge models. *7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, 395–400. DOI: 10.1201/b10554-62.
- Toth J., Motamed R., Panorska A. (2022). A new method for extrapolating the load-displacement response of drilled shaft foundations for interpretation of side capacity. *Soils and Foundations*, 62 (3), 101154. DOI: 10.1016/j.sandf.2022.101154.
- Viggiani C., Russo G., Mandolini A. (2011). *Piles and piles foundation*. New York: Abingdon, Oxon, CRC Press.
- Walsh N.P. (2019). *World's largest 3D-printed concrete pedestrian bridge completed in China*. Pobrano z: <https://www.archdaily.com/909534/worlds-largest-3d-printed-concrete-pedestrian-bridge-completed-in-china> (dostęp: 28.05.2023).
- Wang Y., Liu X., Sang S., Zhang M., Wang P. (2020). A model test for the influence of lateral pressure on vertical bearing characteristics in pile jacking process based on optical sensors. *Sensors*, 20 (6), 1733. DOI: 10.3390/S20061733.
- Wood D.M. (2005). *Geotechnical modeling*. London: Taylor & Francis.

- Wrana B. (2015). Pile load capacity – Calculation methods. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37 (4). DOI: 10.1515/sgem-2015-0048.
- You Z., Chen Y. (2018). The use of tactile sensors and PIV analysis for understanding the bearing mechanism of pile groups. *Sensors (Switzerland)*, 18 (2). DOI: 10.3390/s18020476.
- Zhang Y., Wu W., Zhang H., El Nahhar M.H., Wang K., Jiang G., Mei G. (2021). A novel soil-pile interaction model for vertical pile settlement prediction. *Applied Mathematical Modelling*, 99, 478–496. DOI: 10.1016/j.apm.2021.07.004.
- Żarkiewicz K. (2012). *Weryfikacja zależności wzorów na osiadania kolumn betonowych w oparciu o badania terenowe*. Szczecin: West Pomeranian University of Technology in Szczecin.
- Żarkiewicz K. (2017). *Analiza formowania się oporu poboczniczy pala w gruntach niespoistych na podstawie modelowych badań laboratoryjnych* [rozprawa doktorska]. Szczecin: West Pomeranian University of Technology in Szczecin.
- Żarkiewicz K. (2019a). Lateral stress changes along the pile skin during axial loading in laboratory test. *Geotechnical Engineering Foundation of the Future*, 1–8. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0843.
- Żarkiewicz K. (2019b). Laboratory Experiment of soil vertical displacement measurement near an axially loaded pile. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 603, 032012. DOI: 10.1088/1757-899X/603/3/032012.
- Żarkiewicz K. (2019c). Pile bearing analysis based upon ultimate values of toe and skin resistance as well as their mobilization with settlement. *MATEC Web of Conferences*, 284, 03011. DOI: 10.1051/mateconf/201928403011.
- Żarkiewicz K., Qatameez W. (2021). Assessment of stress in the soil surrounding the axially loaded model pile by thin, flexible sensors. *Sensors*, 21 (21). DOI: 10.3390/s21217214.

Streszczenie

Określenie mechanizmów formowania się oporu poboczniczy i podstawy pala podczas obciążenia statycznego

Głównym celem pracy jest określenie mechanizmów formowania się oporu poboczniczy i podstawy pala wraz z osiadaniem podczas badania obciążenia statycznego oraz zbadanie i opisanie zachowania się gruntu otaczającego pal. Mechanizmy te zostały określone poprzez analizę badań rozkładu oporów na pobocznice i podstawę pala, zmian składowej pionowej i poziomej naprężenia w gruncie oraz przemieszczeń gruntu wokół poboczniczy i podstawy pala.

W rozdziale 1 omówiono aktualne kierunki badań nad współpracą pali z gruntem, w szczególności te oparte na zależnościach obciążenie–osiadanie, które uzyskano dzięki analizom obciążeń statycznych. Wśród nich wyszczególniono obecnie stosowane instrumenty pomiarowe umożliwiające uzyskanie jak najwięcej informacji o współpracy pala z gruntem.

Przedstawiono ogólny stan wiedzy na temat przekazywania obciążenia z pala do podłoża gruntowego poprzez opór poboczniczy i podstawy pala w ujęciu zarówno stanu granicznej nośności, jak i zmiany tych oporów wraz z osiadaniem pala.

Zasadniczą część pracy stanowi rozdział 4, w którym przedstawiono autorskie eksperymentalne badania obciążeń statycznych pali. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych na palach o zmniejszonych wymiarach i niespoistym podłożu gruntowym. Przeprowadzono analizę rozkładu obciążenia przyłożonego w głowicy na opór poboczniczy i podstawy w zależności od osiadania. Ponadto w trakcie badań obciążeń statycznych zmierzono zmiany naprężenia w gruncie spowodowane przekazywaniem obciążenia z poboczniczy i podstawy pala do podłoża gruntowego. Zastosowanie elastycznych dotykowych czujników rozkładu naprężenia umożliwiło pomiar naprężenia z jak najmniejszym wpływem czujnika na sposób przekazywania naprężenia w gruncie. Kolejnym elementem badań był pomiar pionowych przemieszczeń gruntu przy wciskaniu pala za pomocą reperów pomiarowych. Jako uzupełnienie przedstawiono fotogrametryczne badania jakościowe przemieszczeń gruntu wokół pala.

W rozdziale 5 przedstawiono przykłady zastosowania otrzymanych wyników badań w analizie nośności pali w warunkach terenowych oraz pali wykonanych w technologii druku 3D.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań. Ukazano w nim także kierunki dalszych badań.

Abstract

Determination of skin and pile toe resistance mobilization based on static pile load test

The main purpose of the work is to determine the mechanisms of pile skin and toe resistance mobilization with settlement during the static load test and to investigate and describe the behavior of the soil surrounding the pile. These mechanisms were determined by analyzing the distribution of skin resistance and toe resistance; changes the vertical and horizontal components of the stress in soil, and soil vertical displacements around the pile.

Chapter 1 discusses issues that are current directions of research on the interaction of piles with the soil, in particular those based on the pile load-settlement relationship obtained from the study of static pile loads. Among them, currently used measuring instruments have been specified, which enable obtaining as much information as possible about the pile-soil interaction from the static pile load test.

The general state of knowledge regarding the transfer of the load from the pile head to the soil through the resistance of the pile skin and the pile toe in terms of the ultimate limit state as well as changes of these resistances with the settlement of the pile is presented.

The main part of the work is chapter 4, which presents the author's experimental tests of static loads on piles. The tests were carried out in laboratory conditions on piles with reduced dimensions and non-cohesive soil. As part of these tests, tests were performed on the distribution of the load applied in the head to the resistance of the pile skin and the pile toe, depending on the settlement measured at the pile head. In addition, during the static pile load tests, changes in stress in the soil caused by the transfer of the load from the pile skin and toe to the soil were measured. The use of flexible, tactile stress distribution sensors made it possible to measure stress with the smallest possible influence of the sensor on the method of transmitting stress in the soil. The next element of the research was the measurement of the vertical displacements of the soil during the pile pressing with the use of measuring benchmarks. As a supplement, photogrammetric qualitative tests of soil displacements around the pile were presented.

Chapter 5 presents examples of practical applications of the relationships obtained the research refers to the analysis of pile load capacity in field conditions and piles made in 3D printing technology.

Chapter 6 presents a summary and conclusions from the conducted research as well as directions for further research.