

ANDRZEJ SAWICKI, MAREK KULCZYKOWSKI\*

DOŚWIADCZALNE STUDIUM WSPÓŁPRACY  
GWOŹDZIA Z GRUNTEMEXPERIMENTAL STUDY ON THE INTERACTION  
BETWEEN A NAIL AND SOIL

## Streszczenie

W artykule opisano i przeanalizowano zjawiska związane ze współpracą gwoźdź z gruntem. Dotyczy ona przypadku, gdy gwoździe został wprowadzony w grunt dynamicznie, np. poprzez wbicie lub wibrowanie. Wówczas siła potrzebna do wyciągnięcia takiego gwoźdź jest kilkakrotnie większa niż w przypadku zastosowania technologii tradycyjnej, polegającej na wywierceniu otworu w gruncie, wprowadzeniu tam gwoźdź, a następnie zabetonowaniu go. Wytrzymałość gwoźdź na wyciągnięcie (*pull-out resistance*) ma znaczenie przy projektowaniu zbrojonych konstrukcji ziemnych. Zaprezentowano wyniki badań terenowych dotyczących wyciągania gwoźdź z gruntu, w skali naturalnej, oraz wyniki badań laboratoryjnych, przeprowadzonych w specjalnie skonstruowanym urządzeniu. Przeprowadzono prostą analizę teoretyczną procesu wyciągania, której celem było oszacowanie naprężeń w gruncie wokół gwoźdź. Przedstawiono dyskusję omawianych zagadnień oraz zasugerowano kierunki dalszych badań.

*Słowa kluczowe: gwoździowanie gruntów, grunt zbrojony, testy pull-out, sonda statyczna*

## Abstract

An analysis of phenomena appearing during dynamic nailing of soils, by hammering or vibrations, is presented. It was shown experimentally that the pull-out resistance of dynamically driven nail is much higher than that in the case of traditional nailing. Some results of field investigations dealing with pull-out tests are described. Then, laboratory investigations, performed in specially constructed apparatus, are presented and analysed. Discussion of analysed problems is presented and some research directions suggested.

*Keywords: soil nailing, reinforced soil, pull-out tests, geotechnical cone*

---

\* Prof. dr hab. inż. Andrzej Sawicki, dr hab. inż. Marek Kulczykowski, Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku.

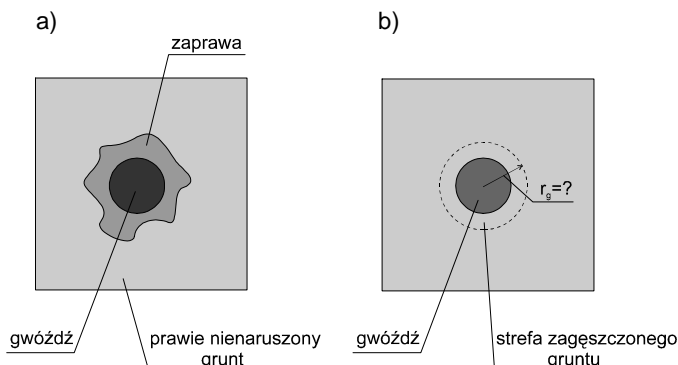
### Oznaczenia

$a$	– szerokość stopki kątownika
$A$	– obwód gwoździa
$b$	– promień cylindra
$c$	– spójność gruntu
$D$	– średnica gwoździa (stożka)
$d$	– empirycznie wyznaczany parametr przy analizie wciskania stożka w grunt
$e$	– empirycznie wyznaczany parametr przy analizie wciskania stożka w grunt
$E$	– moduł sprężystości Younga
$f$	– empirycznie wyznaczany parametr przy analizie wciskania stożka w grunt
$F$	– obliczeniowa wytrzymałość kątowników (gwoździ) na wyciąganie
$F_0$	– maksymalna siła zmobilizowana przy wyciąganiu gwoździa
$h$	– wysokość stożka
$k$	– empirycznie wyznaczany parametr przy analizie wciskania stożka w grunt
$L$	– długość kątownika (długość części gwoździa zagłębionego w gruncie)
$P$	– siła wciskająca stożek (klin)
$r$	– promień pustki
$r_g$	– promień strefy zagęszczenia
$u$	– przemieszczenie radialne wskutek oddziaływania ciśnienia $\sigma$
$x$	– poziome przemieszczenie gruntu
$y$	– przemieszczenie gwoździa przy wyciąganiu
$y_s$	– średnia wartość zagłębienia gwoździa
$z_0$	– zagłębienie stożka (klina)
$\alpha$	– kąt pomiędzy osią stożka (klina) i styczną do jego poboczniczy
$\alpha_g$	– odchylenie gwoździa od pionu
$\delta$	– kąt tarcia pomiędzy gruntem i zbrojeniem
$\gamma$	– ciężar objętościowy gruntu
$\varphi$	– kąt tarcia wewnętrznego gruntu
$\mu$	– współczynnik tarcia pomiędzy gruntem i gwoździem (stożkiem lub klinem)
$\nu$	– współczynnik Poissona
$\sigma$	– naprężenie normalne w gruncie wokół gwoździa
$\tau$	– graniczne naprężenia styczne na kontakcie grunt–gwoździe
$\zeta$	– parametr w analizie wciskania stożka

### 1. Wstęp

W artykule opisano zjawiska zachodzące podczas dynamicznego gwoździowania gruntów, np. poprzez wbijanie (wvibrowywanie) ich w masyw gruntowy. Jest to alternatywna technologia do klasycznego już gwoździowania i jest coraz częściej stosowana na budowach z użyciem dostępnych materiałów, np. różnego rodzaju prętów stalowych, jak kątowniki itp. Nośność na wyciąganie (*pull-out resistance*) jest w tym przypadku znacznie wyższa niż wynikałoby to z metod opracowanych dla technologii klasycznej. Nośność gwoździa na wyciąganie ma wpływ na nośność całej konstrukcji,

dlatego analizowany problem ma szersze znaczenie [4–6, 17, 18, 20]. Zasadniczą różnicę pomiędzy dwoma wspomnianymi technologiami zilustrowano na rys. 1.



Rys. 1. Różnice pomiędzy klasyczną metodą gwoździowania (a) i metodą dynamicznego gwoździowania (b)

Fig. 1. Differences between classical (a) and dynamic (b) nailing

W metodzie klasycznej najpierw w masywie gruntowym wierce się otwór, do którego wprowadza się gwóźdź, a następnie pomiędzy gwóźdź i grunt wstrzykuje się zaczyn cementowy (rys. 1a). W ten sposób powstaje coś w rodzaju konstrukcji kompozytowej, gdzie pierwotny stan naprężenia w gruncie jest prawie nienaruszony. Inna sytuacja następuje podczas wbijania gwoźdź, ponieważ grunt wokół niego zagęszcza się, przez co generowane są dodatkowe naprężenia w gruncie wokół gwoźdź. Zmianie może ulec również struktura uziarnienia gruntu wokół gwoźdź wskutek kruszenia ziaren przez ostrze gwoźdź podczas wbijania.

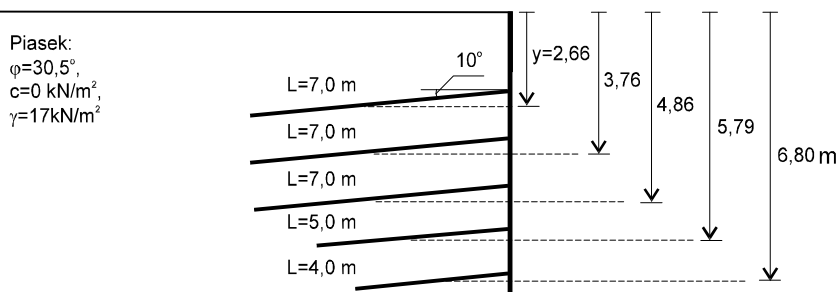
Sam pomysł dynamicznego gwoździowania był wymieniany już dosyć dawno ([4–7]), ale przez długi czas go nie stosowano, wybierając sposób „klasyczny”. W ostatnich latach niektóre polskie firmy zaczęły stosować tę metodę ze względów praktycznych, gdyż można było wykorzystać dostępne materiały i sprzęt, tym samym oszczędzając koszty i czas. Niniejszy artykuł został zainspirowany właśnie współpracą pomiędzy jedną z tych firm a IBW PAN. W trakcie budowy kilku obiektów, gdzie m.in. wykorzystywano metodę dynamicznego gwoździowania, przeprowadzono również testy *pull-out*, które dostarczyły unikatowego materiału do analizy. Przykładowe wyniki tych badań są przedstawione w rozdz. 2.

Następnie w IBW PAN zbudowano oryginalne stanowiska badawcze do badań laboratoryjnych zjawisk występujących podczas dynamicznego gwoździowania. Niektóre z tych wyników oraz próby analizy teoretycznej przedstawiono w rozdz. 3 i 4.

## 2. Badania w skali naturalnej

Pomiary sił oporu na wyciąganie przeprowadzono na kilku obiektach w Trójmieście. Na rys. 2 przedstawiono schemat gwoździowania jednego z wykopów w Gdyni pod budynek Wydziału Biologii i Oceanografii Uniwersytetu Gdańskiego. Jako gwoździ użyto

kątowników L50×50×4, wykonanych ze stali St3S, nachylonych do poziomu pod kątem 10°. Na fot. 1 przedstawiono fragment gwoździowanego wykopu podczas badań, zaś w tab. 1 zestawiono wyniki pomiarów.



Rys. 2. Przykład gwoździowania wykopu w Gdyni

Fig. 2. Nailing of excavation in Gdynia



Fot. 1. Fragmenty gwoździowanego wykopu podczas pomiaru. Wykop zabezpieczono dodatkowo palami

Photo 1. Nailing of excavation during measurements

Tabela 1

Siła oporu na wyciąganie kątowników (por. rys. 2)

Nr warstwy (od góry)	Średnie zagłębienie gwoździa [m]	Długość gwoździa [m]	Siła zmierzona [kN]	Siła obliczeniowa $F$ [kN]
1	2,66	7	48,0	22,1
2	3,76	7	107,5	31,2
3	4,86	7	132,5	40,3
4	5,79	5	137,5	34,3
5	6,80	4	117,5	32,3

Wytrzymałość kątowników na wyciąganie  $F$  oszacowano ze wzoru

$$F = 4aLy_s \gamma \delta \sin \alpha_g \quad (1)$$

gdzie:

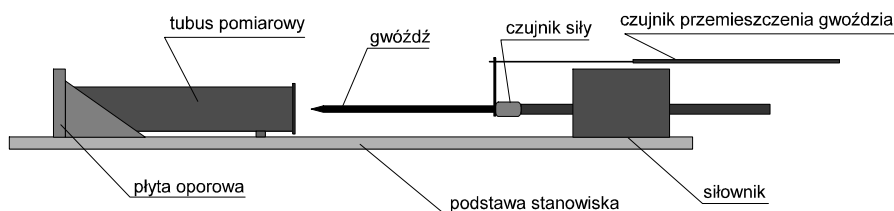
- $a$  – szerokość stopki kątownika,
- $L$  – długość kątownika,
- $\gamma$  – ciężar objętościowy gruntu,
- $y_s$  – średnia wartość zagłębienia gwoźdź,
- $\delta$  – kąt tarcia pomiędzy gruntem i zbrojeniem,
- $\alpha_g$  – odchylenie gwoźdź od pionu.

Przyjęto następujące dane odpowiadające warunkom, na budowie:  $a = 0,05$  m,  $\gamma = 17,0$  kN/m<sup>3</sup>,  $\delta = 19,5^\circ$ ,  $\alpha_g = 80^\circ$ . Dla tych danych obliczono wartość siły  $F$ , korzystając ze wzoru (1). Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tab. 1. Pomierzone wartości siły  $F$  są średnio ponad 4 razy większe niż odpowiednia wartość obliczona wzorem (1).

### 3. Badania laboratoryjne procesu wyciągania gwoźdź

W celu przeprowadzenia badań laboratoryjnych skonstruowano specjalne urządzenie, którego schemat przedstawiono na rys. 3. Składa się ono z rury/tubusa o wewnętrznej długości 56 cm i średnicy 10,7 cm oraz z wyciągarki. Od frontu tubus był wyposażony w szczelnie dopasowaną pokrywę z centralnym otworem o średnicy gwoźdź. Pokrywkę odkręcało się podczas napełniania tubusa piaskiem, a następnie ją przykręcano. Do piasku w tubusie wprowadzano stalowy gwoźdź o całkowitej długości 48 cm i średnicy 16 mm. Z jednej strony gwoźdź wykonano stożkowe ostrze o długości 3 cm, zaś drugi koniec nagwintowano, by umożliwić zespolenie go z wyciągarką. Do badań użyto piasku Stogi, o kącie tarcia wewnętrznego 35°. Współczynnik tarcia między stalą i gruntem  $\mu = \tan \delta$  wyznaczono doświadczalnie ( $\mu = 0,39$ ).

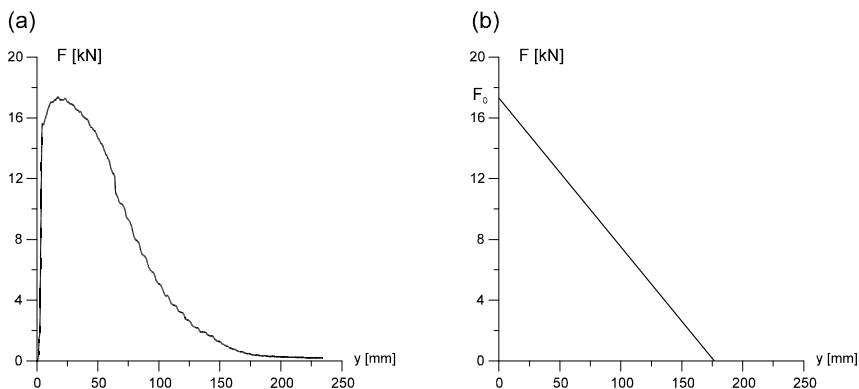
W pierwszych doświadczeniach usiłowano wprowadzić gwoźdź poprzez wciskanie z jednoczesnym pomiarem siły. Ta technika pozwalała na wciśnięcie gwoźdź na niewielką głębokość. Zastosowano zatem metodę wbijania gwoźdź w grunt umieszczony w tubusie za pomocą młota. Taka prymitywna technika pozwalała na wbicie gwoźdź w kolejnych doświadczeniach na głębokość ok. 30 cm, natomiast nie był możliwy pomiar siły stosowanej przy wbijaniu.



Rys. 3. Urządzenie laboratoryjne do badania współpracy gwoźdź z gruntem

Fig. 3. Laboratory device for investigation of the soil-nail interaction

Zasadnicze badania polegały na wyciągnięciu białego uprzednio gwoźdź za pomocą wyciągarki i z dokładną rejestracją siły oraz przemieszczenia. Na rysunku 4a przedstawiono typowy wykres ilustrujący test *pull-out*, gdzie na osi odciętych przedstawiono przemieszczenie gwoźdź, a na osi rzędnych siłę zastosowaną przy wyciąganiu.



Rys. 4. Przebieg testu *pull-out* w doświadczeniach (a); uproszczony schemat (b)

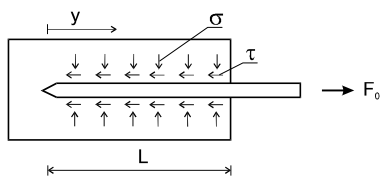
Fig. 4. Record of the pull-out test (a), simplified diagram (b)

Maksymalnej sile wyciągającej odpowiada niewielkie przemieszczenie. Potem siła wyciągająca monotonicznie maleje, zaś na średni trend są nałożone niewielkie oscylacje. Proces redukcji siły wraz z rosnącym przemieszczeniem jest wynikiem redukcji długości strefy kontaktu gwoźdź z gruntem praktycznie aż do zera. Charakter tej uśrednionej krzywej jest lekko nieliniowy, tak że przybliżona aproksymacja modelem liniowym może być usprawiedliwiona jako pierwsze przybliżenie.

Po każdym doświadczeniu badano piasek znajdujący się w tubusie. Stwierdzono, że nastąpiło kruszenie się ziaren, gdyż pojawił się pył. Zauważono również, że wokół ostrza gwoźdź wytworzyła się pierścieniowa struktura złożona z frakcji pylastych, co świadczy też o tym, że podczas wbijania gwoźdź były miażdżone ziarna gruntu. Po lekkim dotknięciu palcem struktura ta rozsypała się.

#### 4. Analiza procesu *pull-out*

Podczas przeprowadzonych doświadczeń procesu wbijania gwoźdź nie kontrolowano, tak jak to się dzieje na budowie. Natomiast proces wyciągania był monitorowany i na nim skupimy uwagę. Największe znaczenie ma tutaj maksymalna siła zmobilizowana przy wyciąganiu gwoźdź, gdyż to ona świadczy o tzw. *pull-out resistance*, co ma znaczenie przy projektowaniu konstrukcji. Schemat najprostszego modelu współpracy gwoźdź z gruntem przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat wyciągania gwoździa z gruntu (sytuacja początkowa)

Fig. 5. Pull-out of nail – initial situation

W trakcie wyciągania gwoździa na powierzchni kontaktu mobilizują się naprężenia ścinające  $\tau$ . Po przekroczeniu pewnej granicy  $\tau = \mu\sigma$ , gdzie  $\sigma$  = naprężenie normalne w gruncie wokół gwoździa,  $\mu$  = współczynnik tarcia pomiędzy gruntem i gwoździem, następuje początek ruchu, czyli wyciąganie gwoździa. Aby to było możliwe, musi być spełniony warunek

$$F_0 = \tau AL \quad (2)$$

gdzie:

- $\tau$  – graniczne naprężenie styczne na kontakcie grunt–gwoździek,
- $A = \pi D$  – obwód gwoździa,
- $D$  – średnica gwoździa,
- $L$  – długość części gwoździa zagłębionego w gruncie.

Ze wzoru (2) można oszacować naprężenie  $\sigma$ , które zostało wygenerowane podczas wbijania

$$\sigma = \frac{F}{\mu AL} \quad (3)$$

Dla danych z rys. 4 otrzymujemy wartość  $\sigma = 4952$  kPa. Jest to oczywiście jakaś średnia wartość tego naprężenia, obrazująca rząd wielkości.

Najprostszy model, który może ilustrować proces wyciągania gwoździa jest opisany następującym równaniem

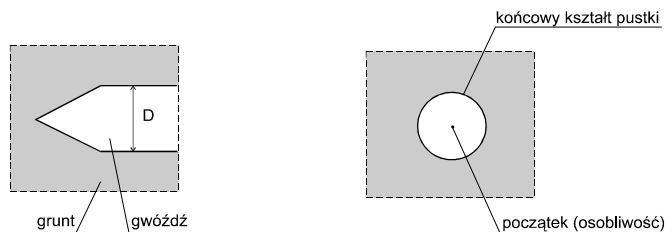
$$F = F_0 \left( 1 - \frac{y}{L} \right) \quad (4)$$

gdzie:

- $F_0$  – maksymalna siła zmobilizowana przy wyciągnięciu gwoździa (dana wzorem (2)),
- $y$  – przemieszczenie gwoździa.

Dla sytuacji z rys. 5  $y = 0$ , zaś po wyciągnięciu całego gwoździa  $y = L$  (por. rys. 4b).

Aby zrozumieć mechanizm wzrostu naprężenia radialnego, można posłużyć się prostym modelem, opisującym ekspansję pustki cylindrycznej. Ten proces ekspansji odbywa się wtedy, gdy ostrze gwoździa penetruje grunt, począwszy od jednolitego masywu, aż do pustki cylindrycznej o średnicy równej średnicy gwoździa (por. rys. 6).



Rys. 6. Ekspansja pustki cylindrycznej wskutek penetracji ostrza gwoźdźcia w grunt

Fig. 6. Expansion of cylindrical cavity due to nail's penetration

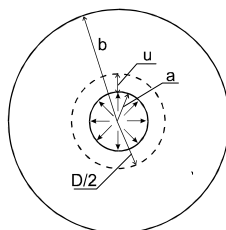
Proces ten jest bardzo złożony i przypuszczalnie, jak dotąd, niezbadany, chociaż samej ekspansji pustki cylindrycznej poświęcono wiele prac, np. [1–3, 9, 12]. Zauważmy, że ekspansja pustki następuje od osobliwości (nie ma pustki na czubku klina) do otworu o średnicy  $D$ . Mamy zatem do czynienia z dużymi przemieszczeniami i odkształceniami, których analiza wymaga złożonego aparatu mechaniki nieliniowej. Ponadto deformacje gruntu wokół ostrza mają charakter plastyczny, co jeszcze bardziej komplikuje problem. Przede wszystkim nie znamy odpowiedniego warunku plastyczności, gdyż ekspansji pustki towarzyszy kruszenie się ziaren, nie wspominając o prawach plastycznego płynięcia, które są ciągle przedmiotem kontrowersji. Oprócz tego istnieje jeszcze problem trójwymiarowy. Do oszacowania badanych zjawisk na razie pozostaje metoda empiryczna. Rozpocniemy od klasycznego modelu ekspansji pustki w ośrodku sprężystym, który znacznie uprościmy. Na rys. 7 przedstawiono geometrię problemu.

Krzyż i Życzkowski [1] podają następujący wzór na radialne przemieszczenia ośrodka wokół pustki

$$u = \frac{a^2 \sigma}{E(b^2 - a^2)} \left[ (1 - \nu)r + \frac{(1 + \nu)b^2}{r} \right] \quad (5)$$

gdzie:

- $r$  – promień pustki,
- $a$  – początkowy promień pustki,
- $b$  – promień analizowanego cylindra,
- $u$  – przemieszczenie radialne wskutek oddziaływania ciśnienia  $\sigma$ ,
- $E$  i  $\nu$  – parametry sprężystości.



Rys. 7. Ekspansja pustki cylindrycznej

Fig. 7. Expansion of cylindrical cavity



Parametry sprężystości  $E$  i  $\nu$  potraktujemy tutaj nie jako rzeczywiste moduły sprężystości, a tylko jako pewne charakterystyki gruntu odpowiadające edometrycznemu ścisaniu. Jest to oczywiście duże uproszczenie, ale dopuszczalne jako pierwsze przybliżenie. Aby oszacować przemieszczenie wokół pustki można założyć, że  $b$  jest duże w porównaniu z  $a$ , oraz przyjąć  $r = a$ . Wówczas wzór (5) redukuje się do postaci

$$u \cong \frac{a\sigma(1+\nu)}{E} \quad (6)$$

Z danych doświadczalnych wynika, że można przyjąć następujące wartości charakterystyk gruntu:  $E = 50$  MPA,  $\nu = 0,2$  (por. [10]). W równaniu (6) występują aż 3 niewiadome, a mianowicie  $\sigma$ ,  $a$  i  $u$ , a zatem powinniśmy znaleźć jeszcze dwa równania albo inne warunki, które pozwoliłyby sformułować problem jednoznacznie.

Możemy np. przyjąć, że wartość  $\sigma$  jest znana, gdyż można ją oszacować z testów *pull-out* (patrz równanie (3)). Wielkość  $a$  można też oszacować eksperymentalnie, np. badając wciskanie stożków w grunt. Zauważmy też, że  $u = D/2 - a$ , co prowadzi do redukcji niewiadomych i równanie (7) przybiera postać

$$\sigma \cong \frac{E}{(1+\nu)} \left( \frac{D}{2a} - 1 \right) \quad (7a)$$

lub

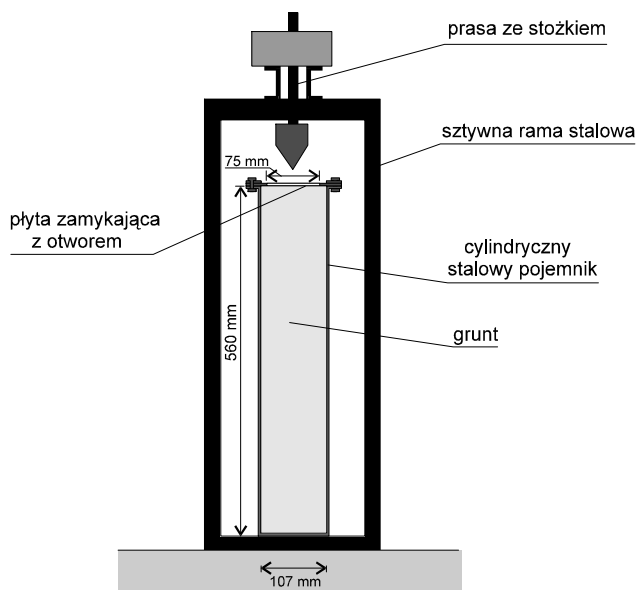
$$a = \frac{D}{2} \left[ 1 + \frac{\sigma}{E} (1+\nu) \right]^{-1} \quad (7b)$$

Przyjmijmy następujące dane odpowiadające przeprowadzonym eksperymentom:  $D/2 = 0,8$  cm;  $\sigma = 2700$  kPa, oraz podane już wyżej wartości  $E$  i  $\nu$ . Ze wzoru (7b) wynika, że  $a$  powinno mieć wartość 7,5 mm. Taki wynik oznaczałby, że prawie cały stożek wchodziłby w grunt praktycznie bez oporu, który dopiero mobilizowałby się na jego końcowej części. Aby to zjawisko zbadać, przeprowadzono dodatkowe eksperymenty.

## 5. Wciskanie stożków – badania doświadczalne

Schemat urządzenia badawczego przedstawiono na rys. 8. Składa się ono z ramy stalowej, na której zainstalowano prasę ze stożkiem oraz z cylindrycznego, stalowego pojemnika wypełnionego gruntem Stogi. Pojemnik jest od góry zamknięty płytą z otworem na stożek. Stożki wykonano z drewna bukowego, o różnej smukłości, scharakteryzowanej kątem  $\alpha$  pomiędzy osią stożka i styczną do jego poboczniczy.

Oprócz badań w aparacie przedstawionym na rys. 8 przeprowadzono badania wciskania stożków w powierzchnię gruntu w skrzyni, gdzie jego deformacja nie była niczym skrupowana. Tutaj jedynie komunikujemy, że takie badania zostały przeprowadzone, gdyż nie mają one bezpośredniego związku z procesem gwoździowania gruntów. Wszelkie informacje na ten temat dostępne są u autorów niniejszego artykułu.



Rys. 8. Schemat stanowiska badawczego do wciskania stożków w grunt

Fig. 8. Laboratory device for investigation of pressing down cones

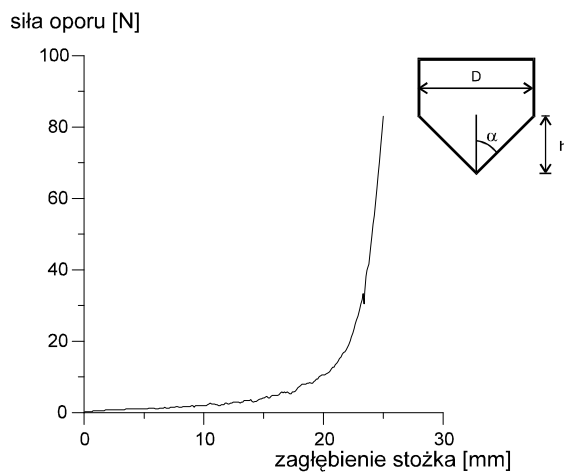
Rys. 9. Zależność siły wciskającej stożek od zagłębienia  $\alpha = 45^\circ$ ,  $D = 50$  mm,  $h = 25$  mm

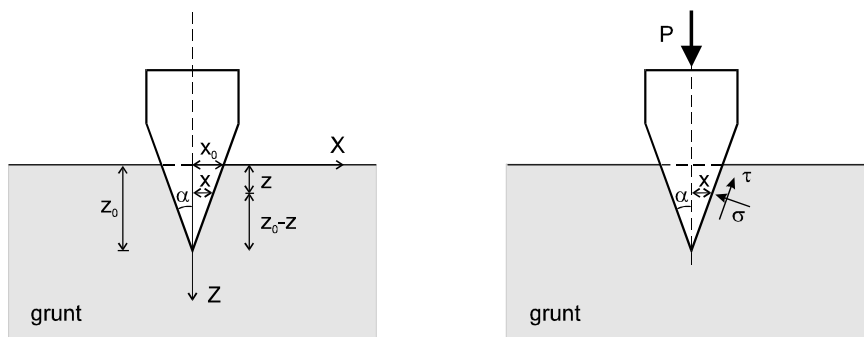
Fig. 9. Relationship between pressing force and displacement of the cone

Na rysunku 9 przedstawiono wykres obrazujący wciskanie stożka o kącie  $\alpha = 45^\circ$ , średnicy 50 mm i wysokości 25 mm. Siła oporu przy wciskaniu tego stożka jest mała aż do zagłębienia do około 20 mm, co stanowi 80% całkowitej wysokości stożka. Od tej wartości siła ta gwałtownie narasta. Wynik ten odpowiada z grubsza oszacowaniu przedstawionemu

w rozdz. 4, gdzie stosunek  $a/0,5D \cong 0,9$ . Oznacza to, że znaczna część stożka wchodzi w grunt praktycznie bez oporu, a zasadniczy opór przy wciskaniu jest mobilizowany dopiero przy wciskaniu jego końcowej części. Wyniki badań dla innych wartości kąta  $\alpha$  są jakościowo podobne do wykresu przedstawionego na rys. 9 (por. [17, 18]).

## 6. Empiryczny opis wciskania stożka

Opisany powyżej proces wciskania stożka w grunt jest zagadnieniem złożonym, ze względu na jego trójwymiarowy charakter oraz na jeszcze nierozpoznane procesy zachodzące w gruncie przy dużych naprężeniach. Najprostszym sposobem opisu jest półempiryczne podejście inżynierskie, w którym uwzględnia się tylko zasadnicze cechy pracy układu klin–grunt. Na rys. 10 przedstawiono możliwie najprostszy schemat takiego układu.



Rys. 10. Schemat wciskania stożka w grunt

Fig. 10. Pressing down the cone into soil

Siła wciskająca  $P$  powoduje reakcję na powierzchni stożka w postaci naprężeń normalnych  $\sigma$  i stycznych  $\tau$ . Najprościej jest przyjąć, że naprężenie  $\sigma$  zależy od poziomego przemieszczenia gruntu  $x$ , czyli  $\sigma = \sigma(x)$ , zaś naprężenie styczne  $\tau = \mu\sigma$ , gdzie  $\mu$  = współczynnik tarcia gruntu o klin.

Możliwie najprostszą zależnością pomiędzy naprężeniem  $\sigma$  a przemieszczeniem  $x$  jest prawo potęgowe

$$\sigma = kx^d \quad (8)$$

gdzie:

$k$  – parametr wyznaczony z wyników doświadczeń,

$d$  – parametr wyznaczony z wyników doświadczeń.

Zauważmy, że dla  $d = 1$  otrzymujemy znany model podłoża winklerowskiego.

Prosta analiza pionowej równowagi klina prowadzi do następującego wzoru

$$P = \zeta \cdot z_0^{d+2} \quad (9)$$

gdzie:

$z_0$  – zagłębienie klina (por. rys. 11),  
zaś  $\zeta$  opisane jest wzorem (10)

$$\zeta = \frac{1}{d+2} 2\pi k (\mu + \operatorname{tg}\alpha) (\operatorname{tg}\alpha)^{d+1} \quad (10)$$

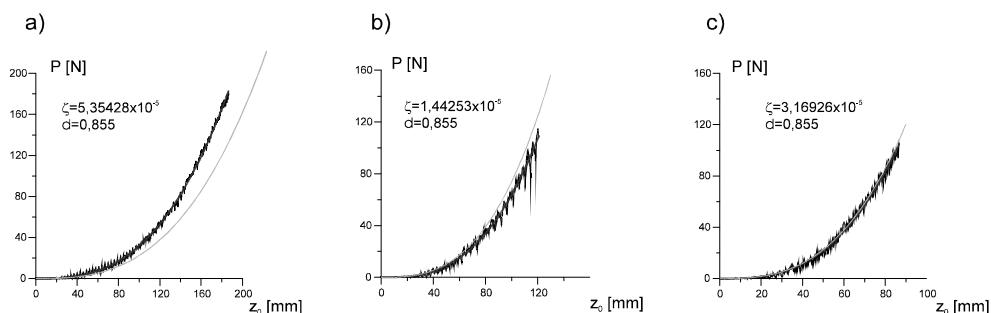
Dane doświadczalne można aproksymować również krzywą potęgową o postaci

$$P = e z_0^f \quad (11)$$

gdzie:

$e$  – wyznaczony empirycznie parametr,  
 $f$  – wyznaczony empirycznie parametr.

Porównując wzory (9) i (11), możemy wyznaczyć parametry  $k$  i  $d$  występujące we wzorze (8). Na rys. 11 przedstawiono porównanie wyników doświadczeń z empiryczną predykcją wzorem (9).



Rys. 11. Porównanie wyników doświadczeń z predykcją empiryczną (a)  $\alpha = 15^\circ$ ; (b)  $\alpha = 22,5^\circ$ ; (c)  $\alpha = 30^\circ$

Fig. 11. Experimental data against analytical approximation

## 7. Dyskusja i wnioski

Technologia gwoździowania gruntów ma coraz większe znaczenie w budownictwie, zwłaszcza w terenach wysoce zurbanizowanych, gdzie różne budowle są posadawiane w bliskim sąsiedztwie innych obiektów. Wykopy muszą być wówczas starannie zabezpieczone, aby te obiekty nie uległy zniszczeniu ani nadmiernym deformacjom. Dlatego też problemy związane ze współpracą gwoźdźa z otaczającym ją gruntem są ważne. W niniejszym artykule zaledwie dotknięto niektóre z tych trudnych zagadnień.

Oryginalnymi elementami pracy są przede wszystkim wyniki badań doświadczalnych przedstawione w rozdziałach 2, 3 i 5, a w mniejszym stopniu uzupełniająca analiza empiryczna tych wyników, przeprowadzona z zastosowaniem możliwie najprostszyc modeli. Badania te m.in. wykazują, że wytrzymałość na wyciąganie gwoździ wbijanych czy

wwibrowywanych w grunt jest kilkakrotnie wyższa niż wynikałoby to z analizy przeprowadzonej klasyczną metodą. Przyczyną tego zjawiska jest m. in. wzrost naprężeń wokół gwoźdźcia wskutek znacznego zagęszczenia gruntu. Tutaj podjęto zaledwie próbę oszacowania tych naprężeń. Może to być interesujący kierunek dalszych badań. Ta hipoteza spowodowała, że autorzy skonstruowali już specjalny edometr do badania gruntów przy dużych naprężeniach.

Inną hipotezą, wysuniętą np. w pracach [6, 10] oraz [20], jest sugestia, że podczas wyciągania gwoźdźcia z gruntu pojawia się wokół niego zjawisko dylatacji, czyli tendencja gruntu do zwiększenia objętości wskutek ścinania. Ponieważ tego typu deformacja jest ograniczona, to następuje wzrost naprężeń. Problem ten jest jeszcze niezupełnie zrozumiały i może być przedmiotem ciekawych badań.

Z dostępnej literatury wynika m.in., że brakuje głębszych analiz teoretycznych i doświadczalnych poświęconych temu ważnemu problemowi. Również tutaj rysuje się kierunek ciekawych i użytecznych badań.

Badania dotyczące wciskania stożków w grunt, przedstawione w rozdz. 5 i 6, mogą mieć również znaczenie podczas analizy pracy sond geotechnicznych. Można stwierdzić, że problem ten jest obecnie rozwiązywalny z zastosowaniem np. metody MES oraz opisu Arbitrary Eulerian-Lagrangian (np. w programie Abaqus) lub metodą cząstek (DEM) lub też metodami bezsiatkowymi (Particle in Cell method). Rezultaty tych prac są dostępne w literaturze, między innymi w pracach [8, 11, 13, 14 i 19].

## Literatura

- [1] Krzyś W., Życzkowski M., *Sprężystość i plastyczność. Wybór zadań i przykładów*, PWN, Warszawa 1962.
- [2] Timoshenko S., Goodier J.N., *Teoria sprężystości*, Arkady, Warszawa 1962.
- [3] Vesic A.S., *Expansion of cavities in infinite soil mass*, Journal Soil Mech. Found. Div., 98, SM3, ASCE, 1972, 265-290.
- [4] Schlosser F., *Behavior and design of soil nailing*, Proc. Symp. Recent developments in ground improvement techniques, ATI, Bangkok 1982, 319-413.
- [5] Juran I., *Nailed-Soil Retaining Structures: Design And Practice*, Transportation Research Record, 1119, 1987, 139-150.
- [6] Schlosser F., *Le Projet National CLOUTERRE*, ITBTP Journal, No. 473, Mars-Avril, 1989.
- [7] Jewell R.A., *Soil nailing – General report*, Performance of reinforced soil structures, British Geotechnical Society, 1990, 197-200.
- [8] Teh C.I., Houlsby G.T., *An Analytical Study of the Cone Penetrometer Test in Clay*, Géotechnique, 41, 1, 1991, 17-34.
- [9] Yu H.S., Rowe R.K., *Plasticity Solutions for Soil Behaviour Around Contracting Cavities and Tunnels*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 23, 12, 1999, 1245-1280.
- [10] Luo S.Q., Tan S.A., Young K.Y., *Pull-out resistance mechanism of a soil nail reinforcement in dilative soils*, Soils & Foundations, 40, 1, 2000, 47-56.
- [11] Więckowski Z., Youn S.K., Yeon J.H., *A particle-in-cell solution to the silo discharging problem*, Int. J. Numer. Meth. Eng., 45, 1999, 1203-1225.

- [12] Yu H.S., *Cavity Expansion Methods in Geomechanics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2000.
- [13] Onate E., Rojek J., Chiumenti M., Idelsohn S.R., Del Pin F., Aubry R., *Advances in stabilized finite element and particle methods for bulk forming processes*, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 195, 2006, 6750-6777.
- [14] Sikora Z., *Sondowanie statyczne: metody i zastosowanie w geoinżynierii*, WNT, Warszawa 2006.
- [15] Świdziński W., *Mechanizmy zagęszczania i upłynniania gruntów sypkich*, Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 2006.
- [16] Zhou W.-H., Yin J.-H., *A simple mathematical model for soil nail and soil interaction analysis*, *Computer and Geotechnics*, 35, 2008, 479-488.
- [17] Kulczykowski M., *Pomiary sił oporu na wyciąganie gwoździ w gwoździowanych ścianach oporowych zabezpieczającej skarpy wykopu w Gdyni przy ul. Piłsudskiego, Raport z badań terenowych*, prace wewnętrzne IBW PAN, Gdańsk 2007.
- [18] Kulczykowski M., *Badania doświadczalne siły oporu na wyciąganie gwoźdź przy uwzględnieniu dylatacji i ograniczonej odkształcalności otaczającego gwoźdź gruntu, Raport z badań doświadczalnych*, prace wewnętrzne, IBW PAN, Gdańsk 2007.
- [19] Nazem M., Sheng D., Carter J.P., Sloan S.W., *Arbitrary Lagrangian-Eulerian method for large-strain consolidation problems*, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 32, 2008, 1023-1050.
- [20] Liu F.-T., Fan Y.-H., Jang S.-W., *Discussion of „A simple mathematical model for soil nail and soil interaction analysis”*, *Computer and Geotechnics*, 36, 2009, 686-687.