

*Piotr Kanty\*, Sławomir Kwiecień\**

## WPŁYW ENERGII FORMOWANIA NA KSZTAŁT KOLUMN WYKONYWANYCH METODĄ WYMIANY DYNAMICZNEJ

---

### 1. Wstęp

Kolumny kamienne formowane metodą wymiany dynamicznej to jedna z wielu metod geoinżynierii [1], szeroko stosowana do wzmacniania gruntów spoistych i/lub organicznych, o miąższości do 6 m, pod obiektami liniowymi [7] i kubaturowymi [2]. Polega ona na wbijaniu w słabe podłoże kruszywa z użyciem uderów o dużej energii, w określonej siatce punktów. Z pozoru prosta technologia, w praktyce może sprawiać pewne trudności. Powodem tego może być przyjęcie nieodpowiedniej energii uderzenia podczas wzmacniania podłoża, co rzutuje na średnicę i długość uzyskanych kolumn. W skrajnych przypadkach może dochodzić do całkowitej wymiany gruntu, bądź wykonania kolumn zbyt krótkich. Pewne informacje na temat doboru energii uderzenia można znaleźć w pracy Stinnette'a i innych [8]. Autorzy cytowanej pracy uważają, że wbijane kolumny powinny być formowane w trzech fazach. Pierwsza z nich, obejmująca wykonanie krateru i kilka wstępnych uderzeń formujących już kolumnę, powinna odbywać się z zastosowaniem małej energii uderzenia. W drugiej, kolumna formowana jest z zastosowaniem większej energii. Faza trzecia, kończąca kolumnę, to zrzuty ubijaka z małej wysokości, służące zagęszczeniu jej głowicy.

Powyższe przesłanki skłoniły Autorów referatu do wykonania szeregu badań, w skali laboratoryjnej, których celem było określenie wpływu energii uderzenia na kształt uzyskiwanych kolumn. Rozważania poprzedzono krótką informacją na temat technologii formowania kolumn wbijanych.

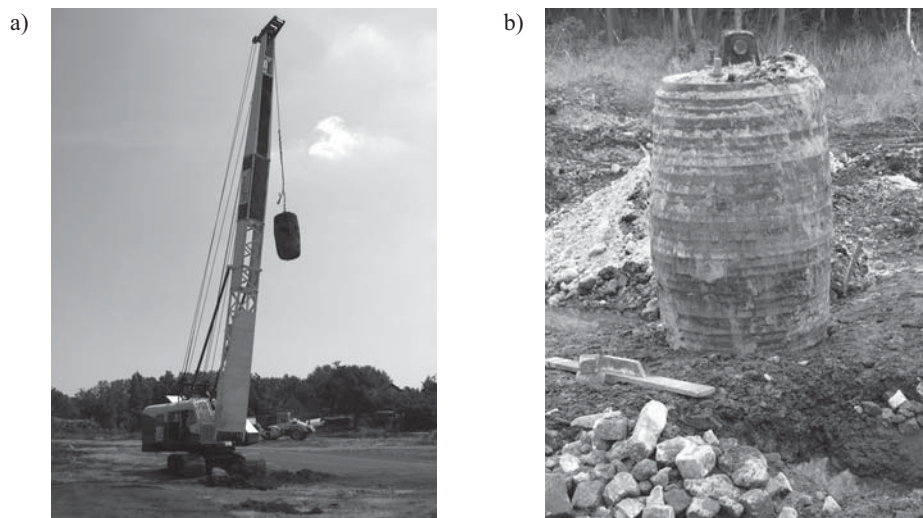
### 2. Metoda wymiany dynamicznej

Do wbijania materiału kamiennego w podłoże stosowane jest urządzenie, umożliwiające swobodny zrzut ubijaka o masie 10–12 t z wysokości 10–25 m.

---

\* Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice

Widok przykładowego sprzętu do formowania kolumn został przedstawiony na rysunku 1.

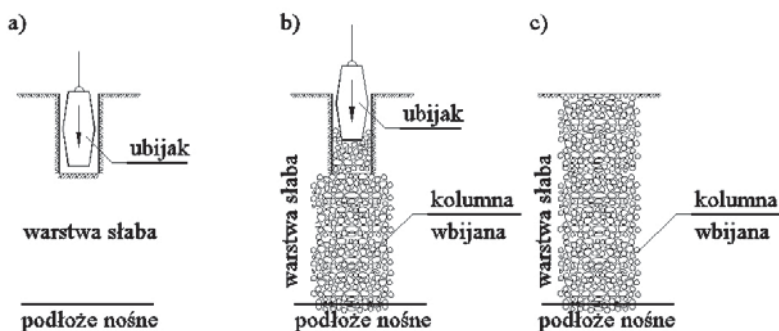


**Rys. 1.** Urządzenie do wykonywania wbijanych kolumn kamiennych (Polbud Pomorze).

a) dźwig o wysokości podnoszenia do 10 m, b) ubijak beczkopodobny o masie 10 t

Jako pierwszy, przez swobodny zrzut ubijaka, wykonywany jest krater (rys. 2a), do którego wysypuje się grubookruchowy materiał. Jest on następnie ubijany (rys. 2b) do chwili, gdy nie zostanie wprowadzony w otaczający grunt. Do ponownie pustego krateru wysypuje się materiał i sytuacja powtarza się (rys. 2b).

Kolumnę wykonuje się do momentu wystąpienia wyraźnego oporu przeciw wbijaniu. Może to oznaczać jej dojście do warstwy o większej sztywności (rys. 2c) lub ograniczenie zagłębiania kolumny ze względu na stosowaną energię uderzenia (kolumna zawieszona).



**Rys. 2.** Proces formowania kolumny kamiennej

Kolumny zwykle wykonywane są z materiału grubookruchowego o średnicy od 30 do 300 mm. Obok materiałów rodzimych w postaci np. tłucznia, coraz częściej stosowane są

różnorodne materiały odpadowe (np.: przepalony łupek kopalniany, żużle wielkopiecowe, kamień dołowy, gruz betonowy). W praktyce bardzo często zastosowanie konkretnego kruszywa na kolumny zależy od jego dostępności na danym terenie.

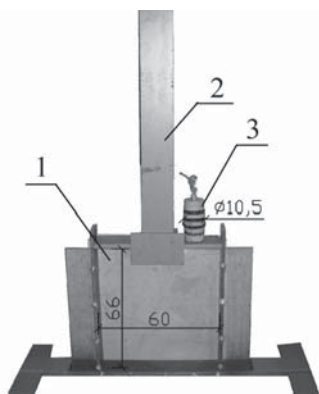
W wyniku wbijania uzyskiwane są kolumny o zróżnicowanych kształtach i średnicach [6]. Po wykonaniu kolumn, parametry fizyczne i mechaniczne gruntu słabego ulegają zmianie, przez co ulega on wzmocnieniu.

Kolumny rozmieszcza się w sposób równomierny lub też zorientowany, o czym decydują warunki wodno-gruntowe i rodzaj projektowanej budowli.

### 3. Badania laboratoryjne

#### 3.1. Konstrukcja stanowiska i materiały

Stanowisko badawcze (rys. 3) umożliwiała obserwację procesu formowania kolumny wbijanej. Jego wymiary dostosowano tak, aby zagadnienie rzeczywiste zamodelować w skali geometrycznej 1:10. Skala ta objęła: geometrię ubijaka, uziarnienie kruszywa stosowanego na kolumny oraz miąższość słabego gruntu.



Rys. 3. Stanowisko do badań modelowych

Na konstrukcję stanowiska składały się (rys. 3):

- komora robocza o wymiarach 12×60×66 cm — „1”,
- prowadnica ubijaka o przekroju kwadratowym 12×12 cm i wysokości 120 cm — „2”,
- ubijak o kształcie beczkopodobnym — „3”.

Niewielka grubość komory „1” — 12 cm oraz zastosowanie szkła akrylowego umożliwiło obserwację interakcji ubijak–kolumna–słaby grunt. Zastosowanie prowadnicy „2” powodowało spadek ubijaka w jedno miejsce. Skonstruowany stalowy ubijak „3” w kształcie beczki miał średnicę 9 cm w części dolnej i górnej oraz średnicę  $D_u = 10,5$  cm w części środkowej. Wysokość ubijaka  $H_u$  wynosiła 20 cm, a jego masa 10 kg. Ubijak podwieszony był liną do rygla przez krążek stały. Maksymalna wysokość zrzutu ubijaka, na przygotowanym stanowisku, wynosiła 110 cm.

Do badań modelowych dobrano materiały modelujące słabą warstwę podlegającą wzmocnieniu oraz materiał wbijanej kolumny. Grunt słaby modelowano trocinami, których wielkości „ziaren” wahały się w przedziale 0,2–3,0 cm. Trociny układane były w komorze badawczej luźno. Miąższość wspomnianej warstwy wyniosła 53 cm. Na materiał kolumn wybrano kruszywo granitowe o wielkości poszczególnych ziaren 0,5–3,0 cm.

### 3.2. Program badań

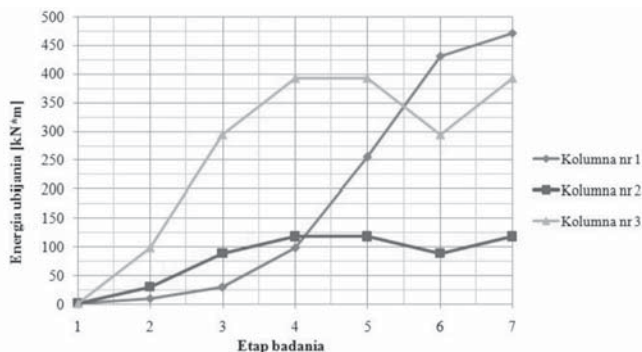
W przeprowadzonych badaniach podjęto próbę uchwycenia wpływu energii uderzenia, zastosowanej podczas formowania kolumn, zgodnie z technologią przedstawioną w punkcie 2, na kształt uzyskanych inkluzji. Jako niezmiennie w badaniach przyjęto rodzaj i stan gruntu podlegającego wzmocnieniu oraz materiał, z którego formowane były kolumny. Zmienną natomiast była zastosowana energia uderzenia w poszczególnych fazach wbijania.

Łącznie wykonano trzy kolumny z kruszywa granitowego.

Pierwsza z nich (nr 1) uformowana została wg zaleceń zawartych w pracy [8] oraz po kilku testach próbnych. Technologia formowania przedstawia się następująco:

- ułożenie trocin luźno o miąższości 53cm — Stan 0,
- utworzenie krateru — Etap 1,
- wbijanie: Etap 2 — zasyp krateru kruszywem, zrzut z wysokości 10cm,  
 Etap 3 — zasyp + 3 zrzuty z wysokości 10cm,  
 Etap 4 — zasyp + 1×10 cm + 3×30 cm,  
 Etap 5 — zasyp + 1×30 cm + 1×50 cm + 2×1 m,  
 Etap 6 — zasyp + 2×1 m + 1×1,2 m,  
 Etap 7 — zasyp + 4×1,2 m — zakończenie badania.

Pozostałe dwie kolumny wykonano przy stałej wysokości zrzutu równej 30 cm (kolumna nr 2) i 110 cm (kolumna nr 3). Nie zmieniono przy tym liczby serii i uderzeń. Na rysunku 4 przedstawiono różnicę w energii ubijania na poszczególnych etapach badania.

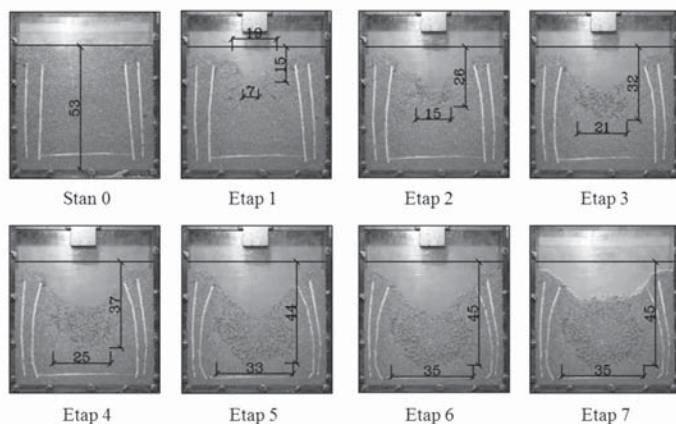


Rys. 4. Sumaryczna energia ubijania na każdym etapie badania

We wszystkich próbach po zakończeniu wbijania nie dokonywano zasypu kolumny do poziomu terenu. Przyjęto, że zasyp ten wypełni pustą przestrzeń i nie wpłynie na kształt i rozmiar kolumny.

### 3.3. Wyniki i analiza badań

Dla zaobserwowania procesów zachodzących podczas wbijania cały proces filmowano i fotografowano. Na rysunku 5 przedstawiono widok kolumny nr 1 na poszczególnych etapach jej formowania. Dzięki zastosowaniu niewielkiej energii uderzenia w początkowych etapach formowania kolumny, (etapy 1–4) uniknięto nadmiernego zagłębienia ubijaka w grunt słaby. W rzeczywistości, przy wypinanym ubijaku i zastosowaniu zbyt dużej wysokości zrzutu, może dojść wręcz do zgubienia ubijaka. Ponadto powstające przy tym duże siły ssące na styku ubijak–grunt słaby mogą uniemożliwić jego wyciągnięcie. Obserwując poszczególne etapy formowania można zauważyć, że kształt kolumny, od początku do końca, ma kształt „dzbana” z charakterystycznym spodem w postaci „półksiężyca”. Koresponduje to jakościowo z wynikami uzyskanymi podczas odkrywek kolumn w skali naturalnej [5].



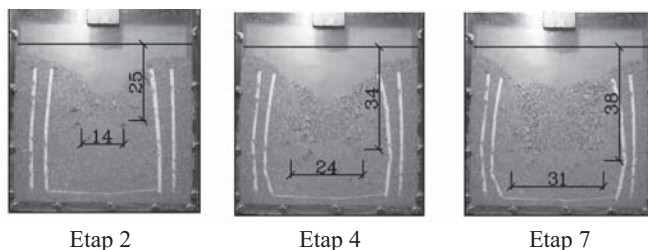
Rys. 5. Etapy powstawania kolumny nr 1

Kolumna uzyskała długość  $H_k$  wynoszącą ok. 45 cm oraz średnicę  $D_k$  równą ok. 35 cm. Stosunek jej długości do średnicy wyniósł więc 1,29. Wykonana kolumna była zatem krępa ( $H_k/D_k < 4$ ) [3].

Wybrane etapy wykonania kolumny nr 2 (ukształtowanej przy stałej, niewielkiej energii uderzenia) pokazano na rysunku 6.

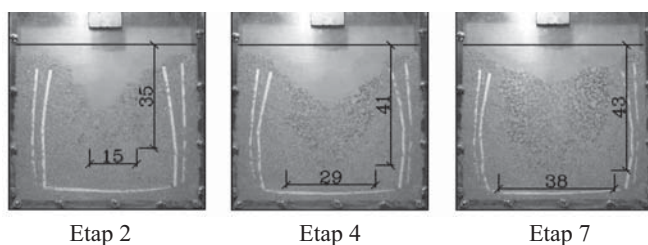
Uzyskana kolumna charakteryzowała się mniejszą średnicą ( $D_k = 31$  cm) i długością ( $H_k = 38$  cm) w porównaniu z kolumną nr 1. Ponadto uzyskano praktycznie stałą średnicę kolumny na jej długości, a jej podstawa była płaska. Małe zagłębienie kolumny wynika z użycia niewielkiej energii uderzenia, która nie była w stanie pogрузić kolumny w końco-

wych etapach jej powstawania. Podobnie jak w poprzednim przypadku kolumna była krępa ( $H_k/D_k = 1,23$ ).



**Rys. 6.** Wybrane etapy powstawania kolumny nr 2

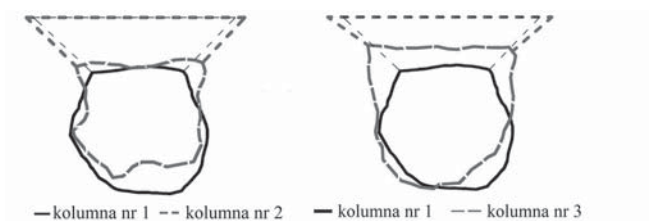
Wybrane etapy formowania ostatniej z kolumn (nr 3) przedstawiono na rysunku 7.



**Rys. 7.** Wybrane etapy powstawania kolumny nr 3

Pomimo zastosowania największej możliwej w badaniach laboratoryjnych energii uderzenia, od początku formowania kolumna nie charakteryzowała się ona największymi gabarytami. O ile uzyskana średnica  $D_k = 38$  cm była największa spośród wykonanych kolumn, o tyle długość  $H_k = 43$  cm była mniejsza od długości kolumny nr 1. W górnej i środkowej części kolumna charakteryzowała się stałą średnicą. Jedynie dół kolumny miał charakter „półksiężycy”. Stosunek długości kolumny do jej średnicy wyniósł 1,13.

Porównanie kształtów uzyskanych kolumn, potwierdzające powyższe spostrzeżenia, przedstawiono na rysunku 8.



**Rys. 8.** Porównanie kształtów: a) kolumn nr 1 i 2, b) kolumn nr 1 i 3

## 4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania, będące częścią pracy [4], wykazały, że kształt i wymiary kolumn wbijanych zależą od energii stosowanej przy ich formowaniu. Przeanalizowano trzy warianty wzmocnienia, a mianowicie: przy względnie stałej lecz niedużej (kolumna nr 2), stałej i maksymalnej w prowadzonych badaniach (kolumna nr 3) oraz stopniowo narastającej (kolumna nr 1) energii. Uzyskano różne pod względem kształtu kolumny, odpowiednio: o regularnym kształcie i najmniejszej średnicy, o największej średnicy oraz o największej długości. Jakkolwiek badania mają charakter jakościowy, to omówione warianty formowania kolumn można odnieść do rzeczywistości. Dodajmy jeszcze, że w przeprowadzonych badaniach pominięto inne czynniki, które zdaniem Autorów mają wpływ na kształt kolumn tj. rodzaj i stan gruntu słabego, zastosowanie platformy roboczej, kształt ubijaka. Są one przedmiotem prowadzonych aktualnie badań modelowych i planowanych badań terenowych.

### LITERATURA

- [1] *Gryczmański M.*: Współczesne kierunki rozwoju geotechniki w Polsce. Inżynieria i Budownictwo, 8, 1994, s. 339–347
- [2] *Gryczmański M., Sękowski J., Kwiecień S.*: Ulepszanie podłoża gruntowego wbijanymi kolumnami kamiennymi. Przegląd Budowlany, 2, 2005, s. 34–37
- [3] *Hughes J. M.O., Withers N.J.*: Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Column. Ground Engineering, vol. 7, No. 3., 1974, pp. 42–49
- [4] *Kanty P.*: Analiza doświadczalna procesu formowania wbijanych kolumn kamiennych w warunkach laboratoryjnych. Magisterska rozprawa dyplomowa. Politechnika Śląska. Gliwice 2010
- [5] *Kwiecień S.*: Analiza teoretyczna i doświadczalna wzmocnienia podłoża metodą wymiany dynamicznej. Praca doktorska. Politechnika Śląska. Gliwice 2008
- [6] *Sękowski J., Kwiecień S.*: Research on the Shape of Stone Columns Formed in the Ground with the Use of Dynamic Replacement Method, ACEE, vol. 1, no. 2, 2008, pp. 65–72
- [7] *Sękowski J., Kwiecień S.*: Wymiana dynamiczna. Praktyczne aspekty zastosowania w budownictwie drogowym. Magazyn Autostrady, 10, 2010, s. 124–128
- [8] *Stinnette P. i inni*: A Quality Control Programme for Performance Evaluation of Dynamic Replacement of Organic Soil Deposits. Geotechnical and Geological Engineering, 15, 1997, pp. 283–302