

Wiesława Kosmala-Kot<sup>1</sup>, Marek Koniecko<sup>1</sup>

## OBLICZANIE ŚCIANEK SZCZELNYCH

### Wstęp

W artykule przedstawiono sposób obliczania parametrów projektowych dla ścianki szczelnej górą jednokrotnie zakotwionej, zaś dołem swobodnie podpartej. Rozpatrzono ściankę pograżoną w gruncie niespoistym - piasku drobnoziarnistym (FSa) oraz gruncie spoistym - glinie piaszczystej (SaSiCl). Analizę zmienności przeprowadzono przy założonych głębokościach wykopu (odpowiednio 5,0 i 4,0 m) i dla różnych stanów gruntu ( $I_D = 0,3; 0,5; 0,7; 0,85$   $I_L = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ ). Na podstawie przeprowadzonych obliczeń podano wzory do określania maksymalnego momentu zginającego  $M_{max}$ ; reakcji podporowej  $R_A$  i położenia miejsca zera wykresu parcia i odporu  $u$  oraz głębokości wbicia ścianki szczelnej  $t$  w funkcji  $I_D$  i  $I_L$ .

### 1. Krótka charakterystyka metody obliczeniowej

Ścianki szczelne składają się z brusów wbitych w grunt, ściśle do siebie przylegających i łączonych na zamki.

Ze względu na przeznaczenie ścianki szczelne możemy podzielić na dwie grupy:

1. **Ścianki szczelne prowizoryczne** lub **tymczasowe**, które stanowią element pomocniczy, potrzebny tylko w okresie wykonywania wykopu i fundamentu, później są usuwane. Zadaniem ich jest zabezpieczenie wykopu od dopływu wody oraz podtrzymywanie ścian wykopu.
2. **Ścianki szczelne** stanowiące konstrukcyjną część fundamentu.

Ścianki te spełniają różne zadania, jak na przykład:

- odgradzają w basenie portowym ląd od rejonów wodnych przy nabrzeżach oczepowych i płytowych,
- uszczelniają podłoże fundamentu we wszelkiego rodzaju budowlach piętrzących wodę,

---

<sup>1</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa, e-mail: wkot@bud.pcz.czest.pl, mkoniecko@bud.pcz.czest.pl

- w posadowieniach bezpośrednich na gruntach nawodnionych mogą wygrodzić podłoże fundamentów budowli i stanowić ochronę przed wyplukiwaniem najdrobniejszych cząstek gruntu.

Głębokość wbicia ścianki szczelnej zależy między innymi od:

- głębokości wykopu lub uskoku terenu,
- rodzaju podłoża poniżej dna wykopu,
- warunków gruntowo-wodnych,
- wielkości obciążeń przekazywanych na ściankę szczelną (wynikają one z parcia gruntu i wody, obciążenia naziomu, obciążenia podłoża w sąsiedztwie ścianki itp.).

Głębokość wbicia ścianki szczelnej ma istotny wpływ na wyniki obliczeń statycznych. Ścianki głębiej wbite są zginane mniejszymi momentami, mniejsze są też reakcje w miejscach podparć.

W praktyce stosuje się następujące rozwiązania:

- ścianki szczelne niepodparte, utwierdzone w gruncie - w tym przypadku ich stateczność zapewnia odpowiednio duża głębokość wbicia poniżej dna wykopu,
- ścianki szczelnie podparte, jedno- lub wielokrotnie górą, dołem zaś podparte swobodnie lub utwierdzone.

Projektowanie ścianek szczelnych przeprowadza się metodami dokładnymi uwzględniającymi przyjęty model podłoża gruntowego, wykorzystując modelowanie MES i odpowiednie programy komputerowe. Można również zastosować metody analityczne znane z rozwiązań mechaniki ogólnej w zależności od przyjętego schematu statycznego czy przybliżone metody graficzno-analityczne, jak choćby metoda Bluma [1-3]. W tych ostatnich punktem wyjścia do obliczeń jest określenie wypadkowego wykresu parcia i oporu jako podstawowego obciążenia konstrukcji ścianek (wykresem tym obciąża się ściankę o danym schemacie statycznym).

Uzyskany wykres wypadkowego parcia i oporu pozwala określić miejsce zerowania się tych oddziaływań, kształt ich przebiegu oraz wyznaczyć wypadkowe wartości parcia i oporu jako sił skupionych wraz z ich usytuowaniem geometrycznym. Określając warunki równowagi jak dla dowolnego układu sił, przy ścianie swobodnie dołem podpartej potrzebną głębokość wbicia ścianki uzyskujemy z warunku równowagi momentów względem poziomej podpory (ściągu czy belki rozporowej). Wyznaczenie tej wielkości geometrycznej pozwala na obliczenie oporu wypadkowego oraz reakcji w podporze z warunku równowagi rzutów sił na oś poziomą (warunek ten można sprawdzić równowagą momentów względem końca ścianki). Maksymalny moment zginający ściankę oblicza się dla rzędnej uzyskanej z warunku zerowania się sił tnących. Mając tak określone wielkości sił wewnętrznych, można dobrać odpowiedni profil ścianki z warunku zginania oraz określić sposób kotwienia ścianki górą na wielkość siły w podporze. Wyznaczoną głębokość wbicia ścianki z obliczeń zwiększa się o 20% ze względu na warunki bezpieczeństwa, wynika to również z mobilizacji oporu granicznego tylko w górnym odcinku ścianki, a nie na całej długości wbicia poniżej dna wykopu.

Obliczenia ścianki szczelnej jednokrotnie kotwionej metodą graficzno-analityczną Bluma.

- Wykonuje się wykres obciążeń ścianki przy założeniach:
  - naziom jest poziomy, a ścianka pionowa,
  - pomija się tarcie między ścianką a gruntem.
- Określa się parcie czynne oraz bierne według wzorów:

$$e_a(z) = qK_a + \gamma zK_a - 2c\sqrt{K_a}$$

$$e_p(z) = qK_p + \gamma zK_p + 2c\sqrt{K_p}$$

gdzie:

$z$  - głębokość poniżej naziomu,

$\gamma$  - ciężar objętościowy gruntu,

$c$  - spójność gruntu,

$$K_a = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\emptyset}{2}\right),$$

$$K_p = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\emptyset}{2}\right),$$

$\emptyset$  - kąt tarcia wewnętrznego.

- Powierzchnię wykresu wypadkowego dzieli się na paski, a obciążenie przypadające na poszczególne paski zastępuje się działaniem poziomych sił skupionych. Parcie wody uwzględnia się w przypadku różnicy jej poziomów po jednej i drugiej stronie ścianki, przy czym rozkład tego parcia przyjmuje się w zależności od tego, czy występuje przepływ wody pod ścianką.
- Wykreśla się wielobok sił i wielobok sznurowy.
- Wykreśla się zamykającą - w przypadku ścianki wolno podpartej w gruncie - z punktu przecięcia pierwszego promienia wieloboku sznurowego z poziomem podpory prowadzi się zamykającą stycznie do wieloboku sznurowego w dolnej jego części.

Punkt styczności wyznacza nam potrzebne zagłębienie  $t$  ścianki, które ze względów bezpieczeństwa zwiększa się o 20%:

$$t = u + 1,2x$$

gdzie  $x$  - odległość od miejsca zerowego wykresu wypadkowego do spodu paska, w którym występuje punkt styczności zamykającej z wielobokiem sznurowym.

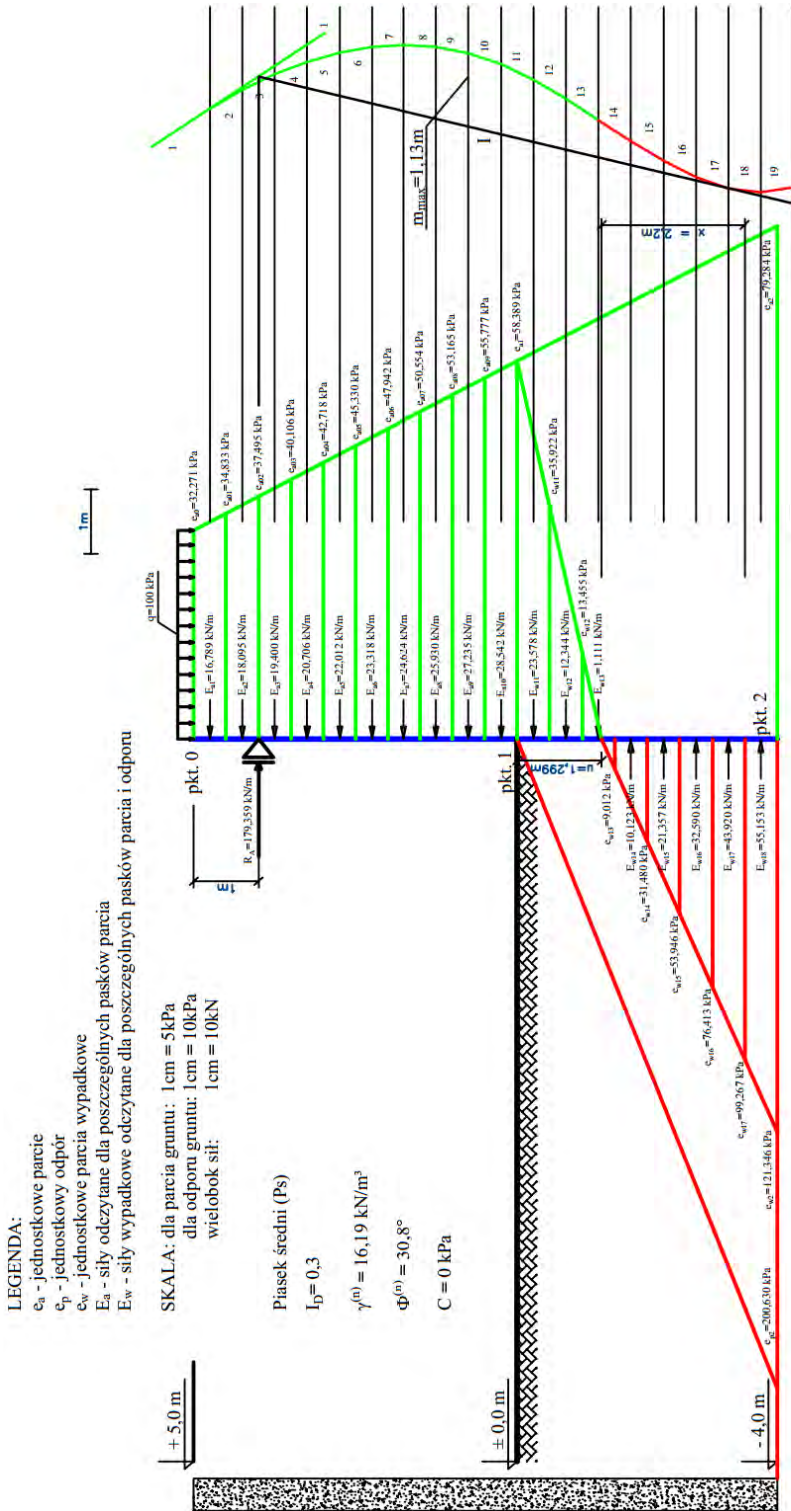
Położenie punktu zerowego „ $u$ ” wyznacza się z wykresu parć wypadkowych.

Przebieg zamykającej pozwala określić z wieloboku sił wartość reakcji w zakotwieniu, zgodnie z warunkiem równowagi sił poziomych. Wartość maksymalnego momentu zginającego oblicza się ze wzoru:

$$M_{\max} = m_{\max}H \text{ [kNm]}$$

gdzie:

$m_{\max}$  - maksymalne wychylenie punktów wieloboku sznurowego względem zamykającej wieloboku mierzone poziomo po kierunku działania wydzielonych sił,  
 $H$  - wielkość tzw. siły biegunowej (wysokość wieloboku sił).



Rys. 1. Wykres parcia i odporu, wielobok sznurowy

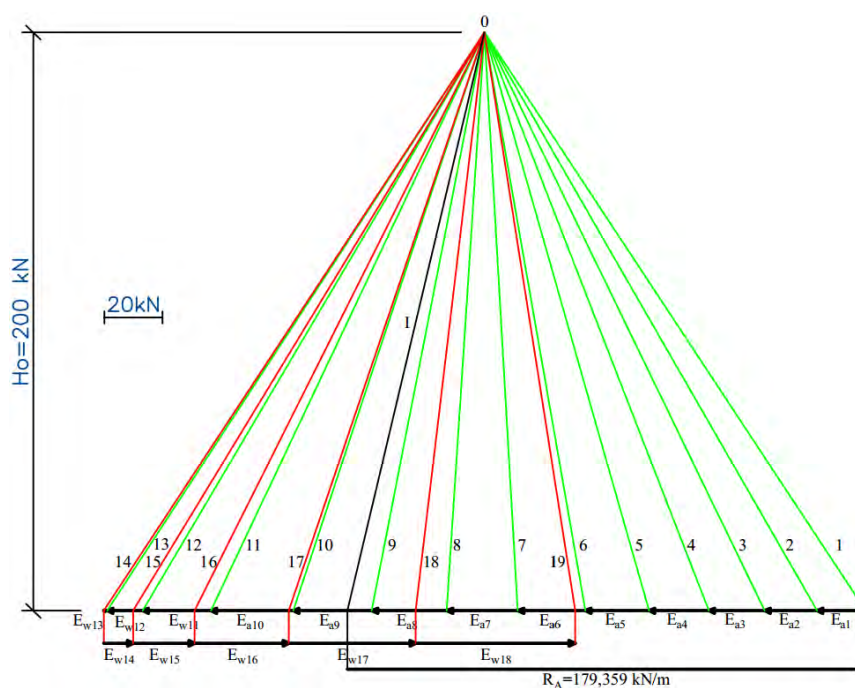
## 2. Przyjęte założenia do obliczeń

Wykorzystując metodę graficzno-analityczną Bluma, przeprowadzono obliczenia ścianki szczelnej górą jednokrotnie zakotwionej zaś dołem swobodnie podpartej pograżonej w gruncie niespoistym, (piasku drobnoziarnistym) FSa oraz gruncie spoistym SaSiCl (głina piaszczysta) zaliczanym do gruntów dawnej genezy B. W przypadku gruntu niespoistego przyjęto głębokość wykopu 5,0 m, zaczepienie podpory górą na wysokości 1,0 m p.p.t., obciążenie użytkowe na naziemiu  $q = 100 \text{ kN/m}^2$ , stan gruntu opisany został stopniem zagęszczenia i wynosił  $I_D = 0,3; 0,5; 0,7; 0,85$ .

Dokonując analizy dla gruntu spoistego przyjęto głębokość wykopu 4,0 m, zaczepienie podpory 1,3 m, obciążenie użytkowe na naziemiu  $q = 50 \text{ kN/m}^2$ , zaś stopień plastyczności opisujący stan gruntu spoistego  $I_L = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ .

## 3. Wyniki obliczeń

Przykładowe rozwiązanie pokazano na rysunkach 1 i 2 dla ścianki pograżonej w gruncie niespoistym o  $I_D = 0,3$ .



Rys. 2. Wielobok sił

W wyniku przeprowadzonych obliczeń poddano analizie zależność maksymalnego momentu zginającego, reakcji podporowej, położenie miejsca „zera” wykresu

parcia i odporu oraz głębokości wbicia ścianki szczelnej od stopnia zagęszczenia oraz od stopnia plastyczności, dla podanych powyżej założeń.

Uzyskane zależności przedstawiono na wykresach, które opisano równaniami, wykorzystując funkcję wykładniczą (rys. 3-8).

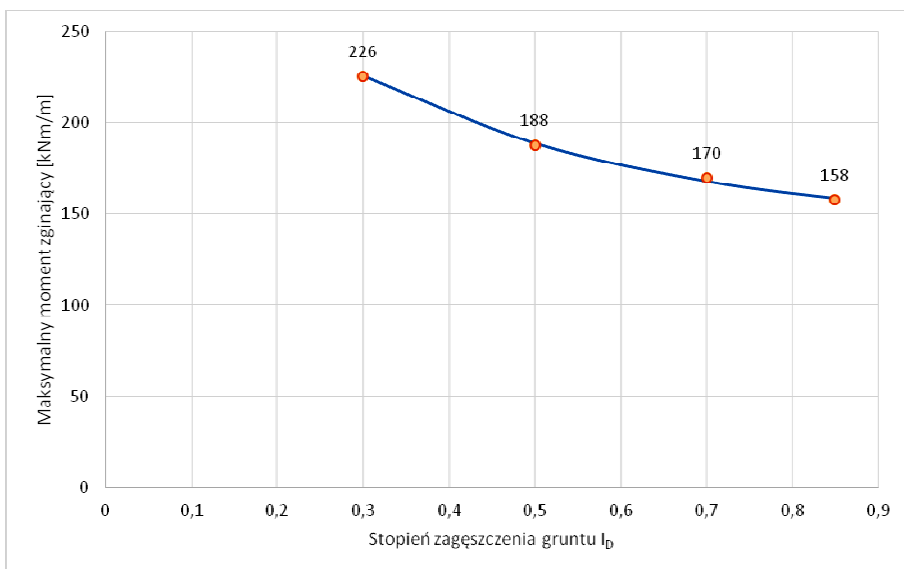
Parametry zaprezentowanych równań oszacowano dzięki rozwiązaniu zadania optymalizacyjnego, polegającego na minimalizacji odchylenia dopasowanej krzywej od punktów wyznaczonych z metody Bluma. Takie podejście umożliwia określenie postaci funkcji parametrycznej, która w sposób najbardziej zbliżony oddaje kształt badanej zależności. Formalną definicję rozwiązanego problemu przedstawiono poniżej:

$$\min_{a_i} \sum_{j=1}^n (y_j - f(x_j; a_i))^2$$

gdzie  $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3, 4$  oraz

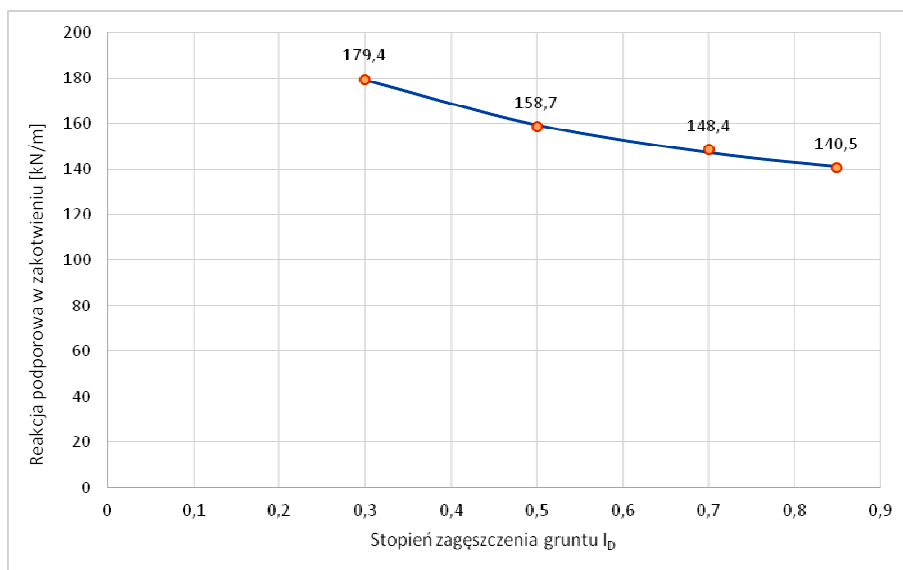
$$f(x; a_i) = a_1 + a_2 e^{a_3 x}$$

Tak określone zadanie optymalizacyjne, z uwagi na nieliniową funkcję celu, rozwiązano numerycznie za pomocą uogólnionej metody gradientu zredukowanego, zaimplementowanej w dodatku Solver do programu Microsoft Excel.



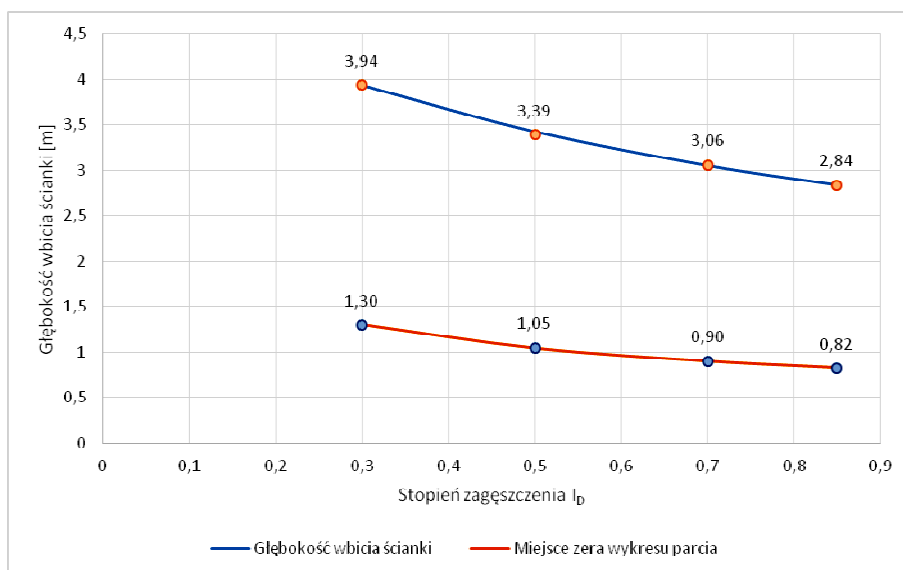
$$M = 141,48 + 199,06 * e^{-2,86 * I_D}$$

Rys. 3. Wykres zależności maksymalnego momentu zginającego od stanu gruntu niespoitego



$$R_A = 127,03 + 106,58 * e^{-2,40 * I_D}$$

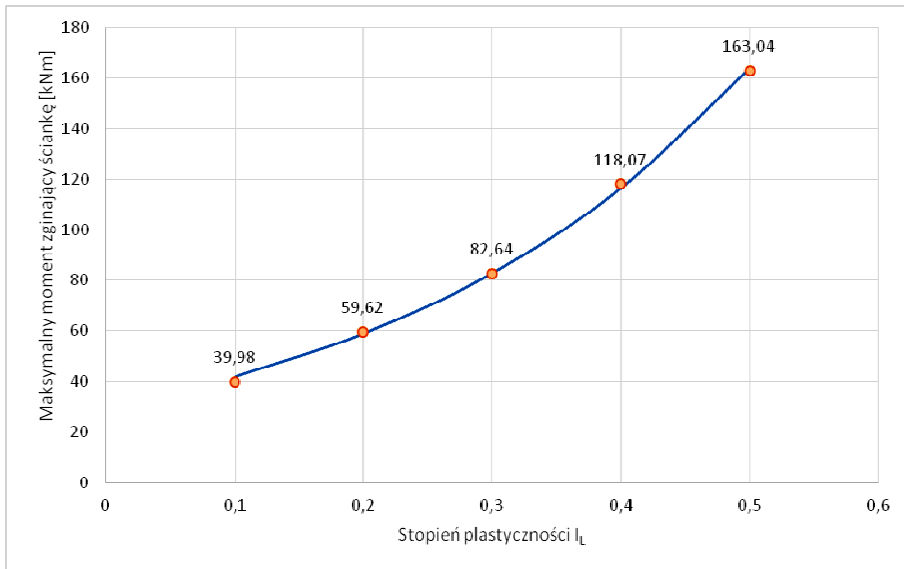
Rys. 4. Wykres zależności reakcji podporowej w zakotwieniu od stanu gruntu niespoistego



$$h = 2,05 + 3,03 * e^{-1,58 * I_D}$$

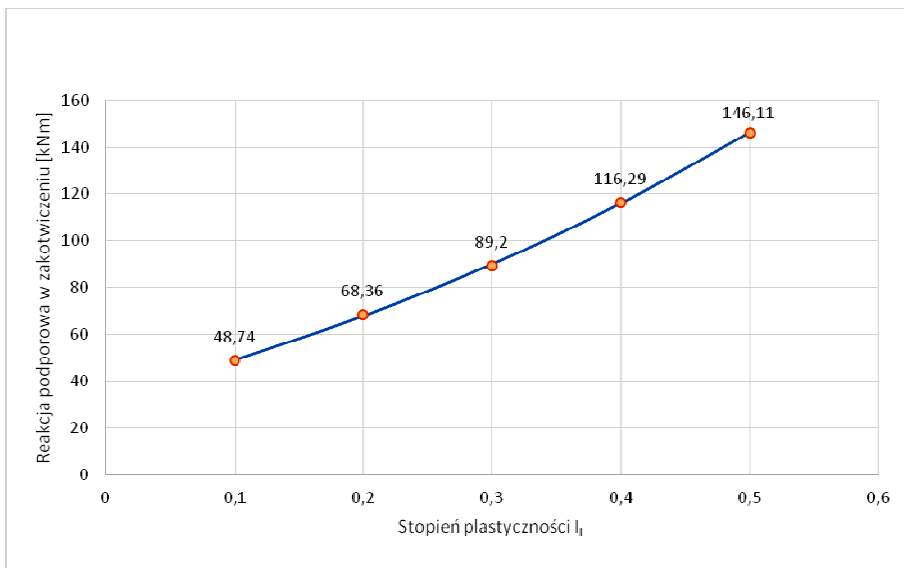
$$u = -0,03 + 0,80 * e^{-0,42 * I_D}$$

Rys. 5. Wykres zależności głębokości wbicia ścianki od stanu gruntu niespoistego



$$M = 29,70 * e^{3,42 * I_L}$$

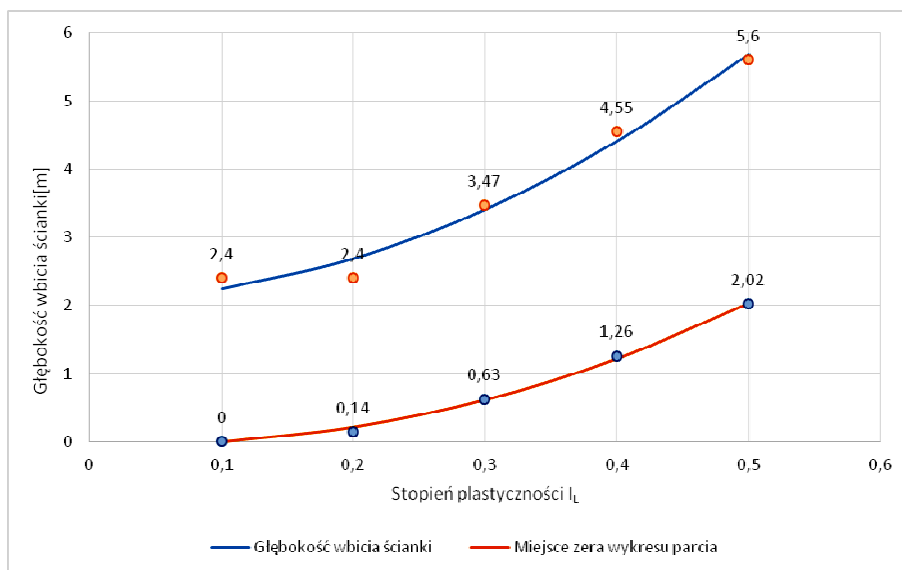
Rys. 6. Wykres zależności maksymalnego momentu zginającego ściankę od stanu gruntu spoistego (geneza B)



$$R_A = -61,66 + 94,42 * e^{1,58 * I_L}$$

Rys. 7. Wykres zależności reakcji podporowej w zakotwiczeniu od stanu gruntu spoistego (geneza B)





$$h = 2,10 + 14,00 * e^{1,97 * I_L}$$

$$u = -0,06 + 9,72 * e^{2,21 * I_L}$$

Rys. 8. Wykres zależności głębokości wbicia ścianki od stanu gruntu spoiстого (geneza B)

## Podsumowanie

W zakresie przyjętych do obliczeń przedziałów zmienności parametrów stopnia: zagęszczenia  $I_D$  i stopnia plastyczności  $I_L$  przedstawiono wzory do określania maksymalnego momentu zginającego ściankę szczelną, wielkości reakcji podporowej, położenia miejsca „zera” wykresu parcia i oporu oraz głębokości wbicia ścianki. Dla dowolnych wartości  $I_D$  i  $I_L$  potrzebne parametry projektowe można określić w oparciu o podane wzory.

## Literatura

- [1] Biernatowski K., Fundamentowanie, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1984.
- [2] Grabowski Z., Pisarczyk S., Obrycki M., Fundamentowanie, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
- [3] Puła O., Rybak C., Sarniak W., Fundamentowanie: projektowanie posadowień, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2001.

## Streszczenie

W artykule omówiono metodę graficzno-analityczną Bluma rozwiązania ścianki szczelnej górą jednokrotnie zakotwionej, zaś dołem swobodnie podpartej. Przeprowadzono obliczenia podstawowych parametrów projektowych dla przyjętych stanów gruntów niespoistego i spoistego. Wyniki

obliczeń przedstawiono na wykresach, pokazując zależności maksymalnego momentu zginającego ściankę szczelną, wielkości reakcji podporowej, położenia miejsca „zera” wykresu parcia i oporu oraz głębokości wbicia ścianki szczelnej od stanów gruntów w analizowanych przedziałach zmienności. Zamieszczono wzory pozwalające obliczyć wyżej wymienione parametry projektowe przy zadanym obciążeniu naziomu i przyjętej głębokości wykopu.

**Słowa kluczowe:** ścianka szczelna, metoda graficzno-analityczna Bluma, parametry projektowania ścianki

## Sheet pile wall calculation

### Abstract

In the article graphical-analytical Blum method for solving single top anchored sheet pile wall bottom support was discussed. Calculation of primary project parameters has been conducted for assumed states of cohesive and non-cohesive soils. Results are presented on graphs and include relation between: maximum bending moment of sheet pile wall, support reaction value, position of 0 state on pressure and resistance graph, sheet pile wall insertion depth versus state of cohesive and non-cohesive soils within analyzed range of variability. Article includes equations allowing to calculate design parameters listed above for given load of cover soil level and excavation depth.

**Keywords:** sheet pile wall, graphical-analytical Blum method, project parameters of wall