

Jarosław KRAŻELEWSKI\*

Politechnika Wroclawska

## LOKALNA STATECZNOŚĆ ELEMENTU SKARPY GWOŹDZIOWANEJ

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono uproszczone modele zniszczenia opisujące wzajemne oddziaływania na kontakcie grunt – element wzmacniający (gwoździ). Kryteria, określające możliwe sposoby zniszczenia struktury grunt-gwoździ, przedstawiono na podstawie względnej sztywności i wytrzymałości gruntu i gwoźdza, oraz lokalnych bocznych przemieszczeń w poprzek strefy ścicia. Lokalne, boczne przemieszczenia powstają wzdłuż potencjalnych powierzchni poślizgu. Zauważono, że wytrzymałość na kontakcie grunt-gwoździ nie zależy tylko od sztywności i umownej granicy plastyczności gruntu, ale również od bocznych przemieszczeń w poprzek strefy ścicia.

## LOCAL STABILITY OF NAILED SLOPE

**Summary.** In this paper, simplified failure modes has been used to describe the behaviour of soil-nail lateral interaction. The criteria for determination of the possible failure modes for a soil-nail are set out on the basis of the relative stiffness and strengths of the soils and nails and the local relative lateral displacement across the shear zone. This local relative displacement is produced along a potential sliding surface of the reinforced soil-nail retaining structure. It is found that the soil-nail lateral resistance is dependent not only on the relative stiffness and yield strengths of the soil and nail and also on the local relative lateral displacement across the shear zone.

### 1. Wstęp

W lokalnej i globalnej analizie stateczności skarp wyróżnia się probabilistyczne metody analizy z uwzględnieniem cząstkowych współczynników bezpieczeństwa, oraz tradycyjne podejście deterministyczne [1]. W pracy analizowano stateczność lokalną elementu skarpy gwoździowanej jedną z metod deterministycznych, jaką jest metoda równowagi granicznej.

---

\*Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Ryszard Izbicki

## 2. Modele współdziałania powierzchniowego na kontakcie grunt – gwóźdź

Na podstawie dostępnej literatury [9] analizowano uproszczone modele współdziałania liniowego elementu wzmacnianego i gruntu. Zauważono, że zniszczenie struktury grunt – gwóźdź może nastąpić, gdy moment zginający przekroczy moment graniczny  $M > M_{\text{limit}}$  lub gdy naprężenie gruntu przekroczy nośność graniczną  $\sigma' > \sigma'_b$ . Warunki te determinują następujące trzy mechanizmy zniszczenia:

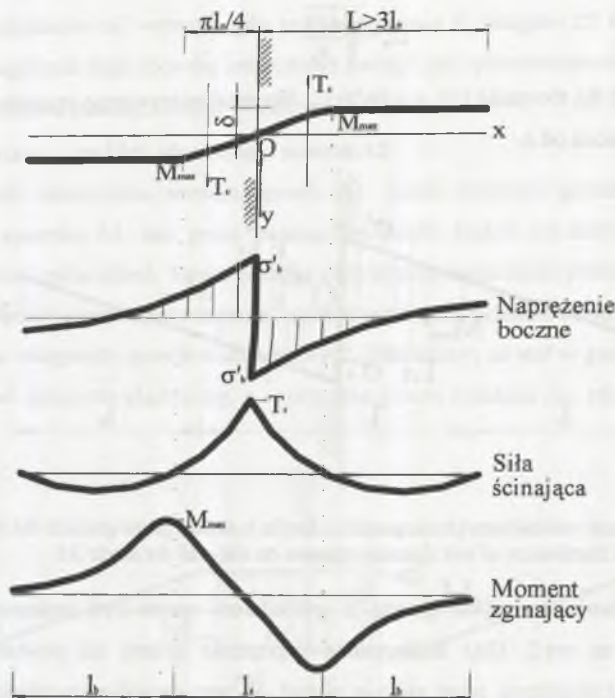
TYP A: Zniszczenie struktury grunt – gwóźdź – po uplastycznieniu gruntu.

TYP B: Zniszczenie struktury grunt – gwóźdź – po uplastycznieniu gwoźdźdza.

TYP C: Zniszczenie struktury grunt – gwóźdź – po osiągnięciu uplastycznienia gruntu i gwoźdźdza równocześnie.

Mechanizmom zniszczenia typu A–C odpowiadają cztery sposoby zniszczenia w zależności od przemieszczenia  $\delta$  w strefie ścinania .

- a) Sposób A1: grunt sprężysty – gwóźdź plastyczny. Grunt zaczyna płynąć w punkcie maksymalnego naprężenia, kiedy gwóźdź jeszcze pozostaje sprężysty. Przemieszczenia są tutaj stosunkowo niewielkie.
- b) Sposób A2: grunt plastyczny – gwóźdź plastyczny. Ten sposób rozwija sposób A1 z uwzględnieniem większych przemieszczeń, kiedy maksymalny moment zginający w gwoździu również osiągnie nośność graniczną.
- c) Sposób B: grunt plastyczny – gwóźdź sprężysty. Gwóźdź zaczyna płynąć w punkcie maksymalnego momentu zginającego, grunt pozostaje w stanie sprężystym.
- d) Sposób C: Plastyczny grunt – gwóźdź. Odpowiada to typowi zniszczenia C.



Rys. 1. Współdziałanie powierzchniowe grunt – gwóźdź proponowane przez Schlossera  
 Fig. 1. Soil – nail lateral interaction proposed by Schlosser

#### Grunt sprężysty – gwóźdź plastyczny: sposób A1

Zakłada się, że gwóźdź jest analogiczny do nieskończenie długiej belki przedstawianej przez Winklera i Hetenyi [2]. Uzyskali oni matematyczny opis zachowania tej belki, przyjęty również przez Schlossera [6] w analizie sprężystego zachowania gwóźdźa.

Rozkład naprężenia gruntu, siły ścinającej i momentu zginającego na powierzchni ściecia jest przedstawiony na rys. 1 (Schlosser [7], Jewell i Pedley [4]).

Następne równanie, Schlosser [6], wyraża przemieszczenie:

$$\delta = \frac{2T_c}{E_s L_o} e^{-x} \cos x, \quad (1)$$

gdzie:

$$x = \frac{z}{L_o}$$

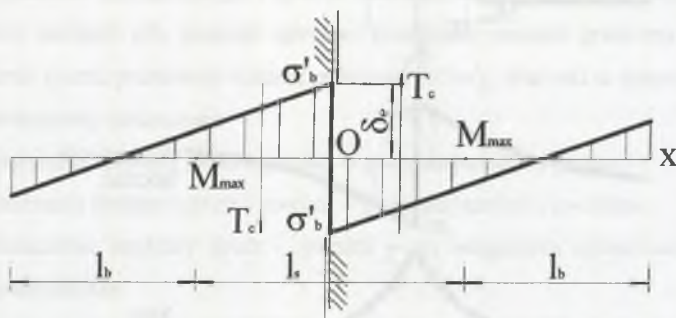
$T_c$  – siła ścinająca,

$z$  – odległość od rozważanego punktu do punktu P,

$L_o$  – parametr zależny od modułu sprężystości .

$$L_o = \sqrt[4]{\frac{4EI}{E_s}} \quad (2)$$

Przyjmuje się, że dla równania (1)  $z < (\pi/2) L_o$ . Wartość relatywnego przemieszczenia  $\delta$  jest liniowa i uzależniona od  $z$ .



Rys. 2. Uproszczony rozkład naprężenia gruntu w strefie kontaktu grunt-gwóźdź dla sposobu A1  
Fig. 2. Simplified distribution of soil reaction pressure on soil-nail for mode A1

Rozkład naprężenia na styku gruntu z gwóździem może być uproszczony, tak jak przedstawiono na rys.2. Gdy maksymalne naprężenie gruntu na powierzchni poślizgu osiągnie wartość graniczną, grunt zacznie płynąć. W tym sposobie szerokość ścienia  $L_s$  jest odległością pomiędzy dwoma punktami, w których występuje maksymalny moment zginający z obydwu stron powierzchni ścienia, wzór (3).

$$l_s = \frac{\pi}{2} L_o = \frac{\pi}{2} \sqrt[4]{\frac{4EI}{E_s}} \quad (3)$$

Zgodnie z równaniem  $l_s$  i długości  $l_b$ , minimalna odległość poza punktami maksymalnych momentów zginających określona jest następująco :

$$l_s = l_b \quad (4)$$

oznacza to, że naprężenie gruntu jest równe  $\sigma' = 0$  dla  $z = l_s$ , jak przyjął Hetenyi [2], a maksymalny moment zginający wynosi:

$$M_{\max} = \frac{1}{12} l_s^2 d \sigma'_b \quad (5)$$

$$(M_{\max} < M_{\text{limit}})$$

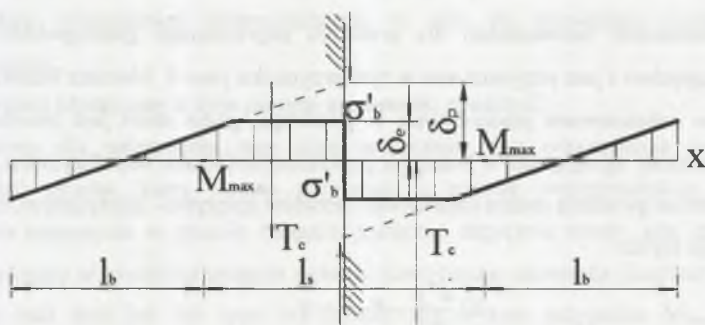
Boczny opór jest określony przez :

$$T_c = \frac{3}{8} l_s d \sigma'_b \quad (6)$$

Graniczne naprężenie  $\sigma'_b$  wystąpi, gdy przemieszczenie  $\delta_c$  osiągnie 25 mm. Dla struktury gwoźdźcia osiągnięcie tego sposobu zniszczenia nastąpi, gdy przemieszczenie aktywnej strefy wzdłuż powierzchni poślizgu będzie większe  $S \geq 50 \text{ mm}$ .

### Grunt plastyczny – gwoźdź plastyczny: sposób A2

Ten sposób zniszczenia rozwija sposób A1. Jeżeli struktura gwoźdźcia nie osiągnie równania ze sposobu A1, tzn. grunt w aktywnej strefie będzie się dalej przemieszczał, a gwoźdź bardziej odkształcał. Grunt zacznie płynąć po powierzchni poślizgu, a moment w gwoździu zacznie rosnąć. Kiedy moment zginający osiągnie wartość momentu plastycznego, wtedy zostanie osiągnięty sposób zniszczenia A2. Zakładamy, że stal w gwoździu zachowuje się jak materiał sprężysto-plastyczny, a naprężenie gruntu rozkłada się, tak jak pokazano na rys.3.



Rys. 3. Uproszczony rozkład naprężenia gruntu w strefie kontaktu grunt-gwoźdź dla sposobu A2  
Fig. 3. Simplified distribution of soil reaction pressure on a soil-nail for mode A2

Przedstawia to następujące równanie:

$$M = T_c L_0 e^{-x} \sin x \quad (7)$$

Naprężenie normalne jest określone wzorem:

$$\sigma'_b = K_s y(0) = \frac{2T_c}{BL_0} \quad (8)$$

Maksymalny moment uzyskujemy dla odległości  $z = (\pi/4)L_0$ ,

$$M_{\max} = 0.32 \sigma'_b BL_0^2 \quad (9)$$

Podczas płynięcia gruntu graniczna siła ścinająca inkluzję w tym punkcie równa się:

$$T_{cl} = \sigma'_b \frac{BL_0}{2} \quad (10)$$

Minimalne wymagane przemieszczenie aktywnej strefy wzdłuż powierzchni poślizgu osiągnie ten sposób zniszczenia, gdy:

$$S = 4.3\delta_e \quad (11)$$

$\delta_e$  wynosi 25 mm, co oznacza, że aktywna strefa musi się przemieścić w dół około 180 mm po powierzchni poślizgu, żeby osiągnąć ten sposób zniszczenia.

#### Grunt plastyczny – gwóźdź sprężysty: sposób B

W tym przypadku grunt jest bardziej sztywny i wytrzymały niż gwóźdź pod względem tarcia bocznego. Gwóźdź zaczyna płynąć, w miejscu gdzie moment zginający przekroczył wartość momentu sprężystego. Krzywizna częściowego przekroju plastycznego jest kontrolowana przez deformacje wciąż elastycznych wewnętrznych włókien. Zostało to opisane przez Hetenyi [2]

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( EI_x \frac{d^2 y}{dx^2} \right) + K_s y d = 0, \quad (12)$$

gdzie  $I_x$  momentem bezwładności dla przekroju poprzecznego grunt-gwóźdź, a  $y$  jest bocznym ugięciem i jest przyjmowane w tym przypadku jako  $\delta$ . Moment bezwładności  $I_x$  różni się ze zwiększeniem plastyczności w przekroju, gdzie obrót jest określony, przez wielkość momentu zginającego, w przekroju poprzecznym kształtu współczynnika.

Gdy materiał gwóźdźnia można idealizować modelem sprężysto–plastycznym, to równanie (12) redukuje się do:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + K_s y d = 0. \quad (13)$$

Jest to dokładnie to samo równanie sprężystej analizy [2] ważne dla wszystkich przekrojów, z wyjątkiem przekroju gdzie znajduje się przegub plastyczny. Szerokość strefy ścięcia pomiędzy dwoma plastycznymi przegubami z dwóch stron powierzchni ścięcia (rys.4) może być określona równaniem (3). Profil rozkładu naprężenia w gruncie, bardzo podobny do sposobu A1, pokazano na rys. 4 linią przerywaną.

Boczny opór w tym sposobie równa się:

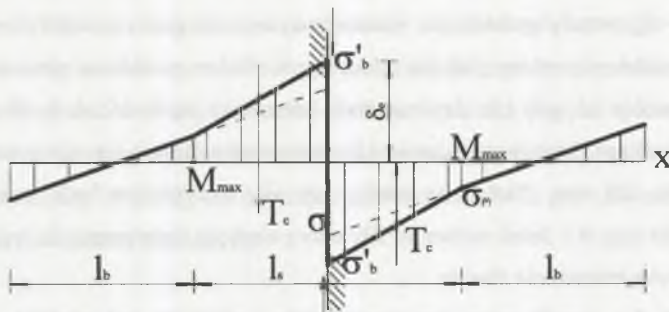
$$T_{e2} = \frac{M_{\max}}{L_o} + 0.24 p_i B L_o. \quad (14)$$

zgodnie z przemieszczeniem strefy aktywnej wzdłuż powierzchni poślizgu, która wynosi:

$$S = \frac{24 M_{\lim}}{K_s L_s^2 d}, \quad (15)$$

gdzie:  $L_s$  - jest obliczane zgodnie z równaniem (3).

Teoretycznie wartość przemieszczenia  $S$  jest mniejsza niż 50 mm jak  $\sigma'_{\max} < \sigma'_b$ .



Rys. 4. Uproszczony rozkład naprężenia gruntu na grunt-gwóźdź dla sposobu B  
 Fig. 4. Simplified distribution of soil reaction pressure on a soil-nail for mode B

Jeżeli struktura grunt – gwóźdź nie osiągnie równania dla sposobu B, grunt w aktywnej strefie będzie kontynuował przemieszczenie w dół, co spowoduje dalsze boczne przemieszczenia.

#### Grunt i gwóźdź plastyczny w tym samym momencie: sposób C

Warunkiem dla osiągnięcia tego typu zniszczenia jest odpowiednia sztywność i wytrzymałość gruntu, którą można porównać z boczną wytrzymałością gwóźdź. Maksymalne naprężenie w gruncie osiągnie graniczne naprężenie wtedy, gdy maksymalny moment zginający w gwóźdźu osiągnie nośność plastycznego momentu. Rozkład naprężenia gruntu jest taki sam jak dla typu A1 (rys.2), ale w tym przypadku  $M_{max} = M_{limit}$ . Wytrzymałość grunt - gwóźdź może być obliczona z równania (6) lub (14) ze zmianą  $L_s$  na:

$$l_s = d \sqrt{\frac{2\sigma_y}{\sigma'_b} \left(1 - \frac{\sigma_t^2}{\sigma_y^2}\right)}. \quad (16)$$

Maksymalny moment zginający obliczamy z równania (5). Wymagane przemieszczenie gruntu w aktywnej strefie po powierzchni poślizgu wynosi  $S = 2\delta_e = 50 \text{ mm}$ .

Żeby osiągnąć ten typ zniszczenia, określamy krytyczną średnicę stali  $d_{cr}$  dla struktury grunt– gwóźdź, którą obliczamy z równania (3) i (16):

$$d_{cr} = 0.3 \frac{E\sigma_t^{1.2}}{K_s\sigma_y^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{\sigma_t^2}{\sigma_y^2}\right)^2}. \quad (17)$$

#### 2.1. Kryteria określające sposoby zniszczenia

Równanie (17) może być kryterium dla określenia możliwych sposobów zniszczenia struktury grunt–gwóźdź, jak przedstawiono poniżej.

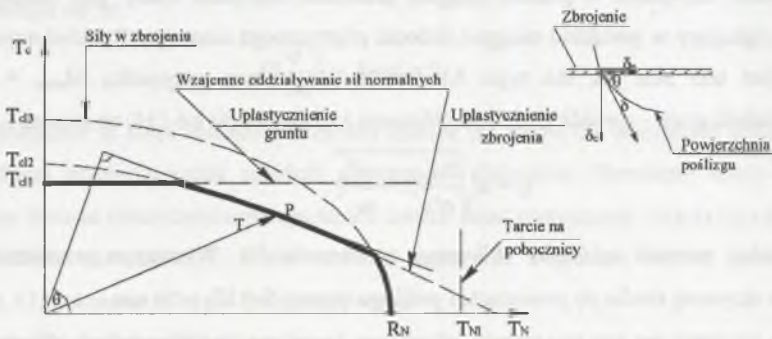
Jeżeli  $d > d_{cr}$ , wtedy gwóźdź jest bardziej sztywny niż grunt, a współpraca pomiędzy gruntem a gwoździem przebiega, tak jak opisuje typ A. Grunt-gwóźdź osiągnie stan zniszczenia jak w sposobie A1, gdy jak aktywna strefa przemieści się w dół około 50 mm wzdłuż powierzchni poślizgu. Sposób zniszczenia A2 progresywnie rozwija się, gdy przemieszczenie osiągnie około 108 mm. Nastąpi to wtedy, gdy siły utrzymujące będą mniejsze od sił niszczących dla typu A1. Jeżeli natomiast siły oporu nie będą dostateczne dla typu A2, wtedy nastąpi całkowite zniszczenia zbrocza.

Jeżeli  $d < d_{cr}$ , wtedy grunt jest sztywniejszy i silniejszy niż gwóźdź. Współpraca pomiędzy gruntem a gwoździem osiągnie mechanizm zniszczenia B. Całkowite zniszczenie uzyskamy, jeżeli grunt-gwóźdź nie powstrzyma aktywnej strefy od przemieszczenia.

Jeżeli  $d = d_{cr}$ , wytrzymałość i sztywność gruntu jest porównywalna do gwoździa, co oznacza, że zniszczenie gruntu i gwoździa nastąpi równocześnie. Wymagane boczne przemieszczenia dla struktury grunt – gwóźdź wynosi 50 mm.

## 2.2. Kombinacje różnych sposobów zniszczenia. Zasada maksymalnego obciążenia

Kombinacje różnych sposobów zniszczenia inkluzji zostały przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Zasada maksymalnego obciążenia  
Fig. 5. Principle of maximum work

gdzie:  $T_{c1}$  – maksymalna siła poprzeczna, gdy grunt uplastycznia się wcześniej niż zbrojenie,  
 $T_{c2}$  – maksymalna siła poprzeczna, gdy zbrojenie uplastycznia się wcześniej niż grunt,  
 $T_{c3}$  – maksymalna siła poprzeczna odpowiadająca rzeczywistej wytrzymałości na ścinanie zbrojenia.



Na wykresie  $T_c$  ( $T_n$ ) (rys.5) podano, że zestawienie różnorodnych kryteriów prowadzi do uzyskania obwiedni punktów, w których moment zginający równa się zero. Wykreślając przemieszczenie gruntu wzdłuż powierzchni poślizgu  $\delta$ , na tym samym wykresie  $T_c$  ( $T_n$ ), z zasady pracy maksymalnej wynika, że styczna do powierzchni poślizgu, poprowadzona przez punkt przyłożenia siły  $T(T_c, T_n)$ , jest prostopadła do kierunku  $\delta$ . To pozwala zdefiniować siły  $T_c, T_n$  wzdłuż powierzchni poślizgu [8].

### 3. Wnioski

Przedstawione w pracy modele współdziałania powierzchniowego na kontakcie grunt-gwóźdź nie zależą tylko od sztywności i umownej granicy plastyczności gruntu i gwoźdźcia, ale również od relatywnego bocznego przemieszczenia gruntu. Boczny opór generalnie wzrasta wraz ze względnym przemieszczeniem bocznym, zanim grunt zacznie płynąć. Ponadto relatywne przemieszczenie pomiędzy gwoździem a gruntem jest bardzo ważnym czynnikiem, kontrolującym współdziałanie powierzchniowe na kontakcie grunt-gwóźdź. Poprawny sposób zniszczenia może być określony na podstawie wartości przemieszczenia względnego w strefie ścięcia. Wymagane minimalne przemieszczenie gruntu w aktywnej strefie wzdłuż powierzchni poślizgu dla sposobu zniszczenia A1 i C jest około 50 mm, a dla sposobu B jest mniejsze niż 50 mm. Dla sposobu A2 minimalne przemieszczenie gruntu w strefie aktywnej wynosi około 108 mm i jest niedopuszczalne w praktyce projektowej.

### LITERATURA

1. Greenwood D.A., Speculations on methods of stabilising slopes, Ground Improvement vol.2, no3, July 1998, pp.103-124.
2. Hetenyi M., Beams on Elastic Foundation. University of Michigan Press, 1946.
3. Izbiński R.J., Szczesniak K., Soling nailing application to geotechnical protection of hydroengineering structures, Prace naukowe Inst. Geotech. i Hydrotech. Pol. Wrocław, seria Konf., nr38, 1996, pp.320-327.
4. Jewell R. A. and Pedley M. J., Analysis for soil reinforcement with bending stiffness. Journal of Geotechnical Engineering, No. 10, 1992, pp.1505-1529.

5. Nilsen B. New trends in rock slope stability analysis, Bull. Eng. Geol. Env. 58, 2000, pp173-178.
6. Schlosser F., Behaviour and design of soil-nailing. Proceedings of an International Symposium, Asian Institute of Technology, Bangkok, 29 Nov. – 3 Dec., 1982, pp.399-419.
7. Schlosser F., Analogies et différences dans le component et le calcul des ouvrages de soutènement en terre armée et par clouage du sol. Sols et Fondations, Annales ITBTP, No. 418, 1983,
8. TALREN 97 – TERRASOL - poradnik.
9. Tan S.A, Lou S.Q, Young K.Y, Simplified models for soil –nail lateral interaction. Ground Improvement no 4, 2000, pp.141-152.

Recenzent: Dr hab. inż. Janusz Dłużewski, prof. Politechniki Warszawskiej

#### **Abstract**

In this paper, simplified failure modes has been used to describe the behaviour of soil-nail lateral interaction. The criteria for determination of the possible failure modes for a soil-nail are set out on the basis of the relative stiffness and strengths of the soils and nails and the local relative lateral displacement across the shear zone. This local relative displacement is produced along a potential sliding surface of the reinforced soil-nail retaining structure. It is found that the soil-nail lateral resistance is dependent not only on the relative stiffness and yield strengths of the soil and nail and also on the local relative lateral displacement across the shear zone.