

Maciej Kędracki*

DEGRADACJA POWIERZCHNI TERENU WYNIKAJĄCA ZE STOSOWANIA METOD BEZWYKOPOWYCH I ZABEZPIECZENIA PRZED TYM ZJAWISKIEM

1. WSTĘP

Stosowanie metod bezwykopowych wpływa destrukcyjnie na otaczające środowisko. Objawia się to przede wszystkim w postaci osiadań i zapadlisk powierzchni terenu. W artykule rozważono powody i zasięg negatywnych następstw stosowania metod bezwykopowych, a także dokonano przeglądu stosowanych zabezpieczeń przed negatywnymi skutkami tych robót.

2. NAPRĘŻENIA PIERWOTNE W GRUNTACH

Grunty znajdują się w stanie równowagi sprężystej. Naruszenie tego stanu naprężenia, które może nastąpić na skutek np. budownictwa podziemnego, powoduje przejście gruntów w stan naprężeń plastycznych. Jeżeli naprężenie główne pionowe oznaczmy $\sigma_v = \sigma_I$ i poziome $\sigma_h = \sigma_{III}$, to można je przedstawić dla gruntów niespoistych w sposób zaprezentowany na rysunku 1. W gruntach spoistych natomiast, stan naprężeń w półprzestrzeni sprężystej przedstawiono na rysunku 2.

Z zależności geometrycznych przedstawionego wykresu Mohra można wyznaczyć naprężenia główne poziome:

$$\sigma_I = 2c \operatorname{ctg} \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + \sigma_{III} \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = 2c\sqrt{N_\phi} + \sigma_{III} N_\phi \quad (1)$$

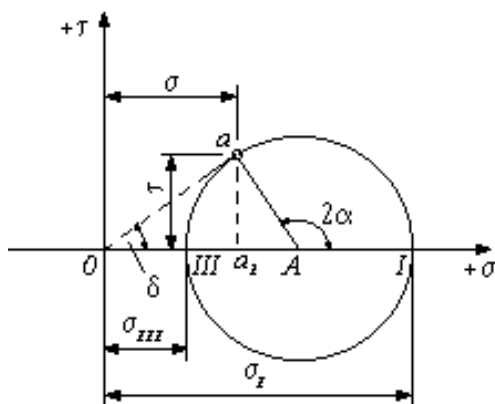
$$\sigma_{III} = \frac{\sigma_I}{N_\phi} - 2c \frac{\sigma_I}{\sqrt{N_\phi}} \quad (2)$$

* Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka

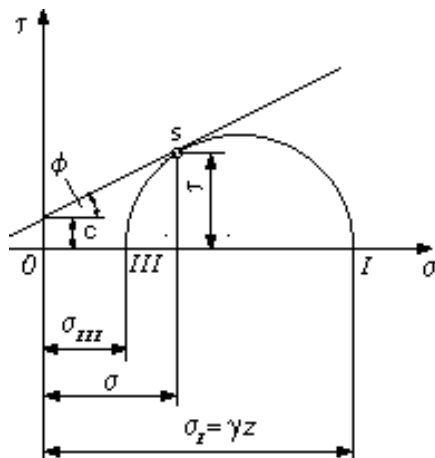
Oznaczenie

$$N_{\phi} = \operatorname{tg}^2 \left(45^{\circ} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (3)$$

stosuje się do uproszczenia wzoru (2).



Rys. 1. Wykres naprężeń w półprzestrzeni sprężystej wg Mohra: σ_I, σ_{II} – naprężenia główne odłożone na osi poziomej, τ – naprężenia styczne, α – kąt nachylenia naprężeń stycznych, σ – naprężenie normalne odpowiadające naprężeniu tnącemu τ , δ – kąt pochylenia wypadkowej naprężeń w punkcie a do osi naprężeń σ



Rys. 2. Stan naprężeń w półprzestrzeni sprężystej w gruncie spoiowym: c – spójność, ϕ – kąt tarcia wewnętrzny, γ – ciężar objętościowy gruntu, s – naprężenia styczne – przejście ze stanu naprężeń sprężystych w stan naprężeń plastycznych:

$$s = c + \sigma \operatorname{tg} \phi - \text{równanie Coulomba} \quad (4)$$

Po podstawieniu $\sigma_1 = \gamma z$ do wzoru (2) otrzymujemy

$$\sigma_{III} = \sigma_h = \frac{\gamma z}{N_\phi} - \frac{2c}{\sqrt{N_\phi}} \quad (5)$$

Zakładając, że grunt jest niespoisty, czyli spójność $c = 0$, wtedy

$$\sigma_{III} = \sigma_h = \frac{\gamma z}{N_\phi} = \frac{\gamma z}{\operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)} = \gamma z \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (6)$$

Jest to wzór Coulomba–Rankine’a na parcie boczne w gruntach niespoistych i powierzchni gruntu.

Wzór ten można przy pewnym uproszczeniu stosować dla gruntów spoistych (mimo braku elementu c , czyli spójności), zakładając większą wartość kąta tarcia wewnętrznego ϕ , niż wynika z badań, czyli – ϕ zastępcze.

Według Rankine’a istnieją dwie możliwości stanów naprężenia:

- 1) przy ruchach rozprężających (rozluźniających) cząsteczki gruntu – stan czynny

$$\sigma'_h = \gamma z \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (7)$$

- 2) przy ruchach zagęszczających cząsteczki gruntu – stan bierny

$$\sigma''_h = \gamma z \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (8)$$

W gruntach spoistych wzory (7) i (8) otrzymują postać:

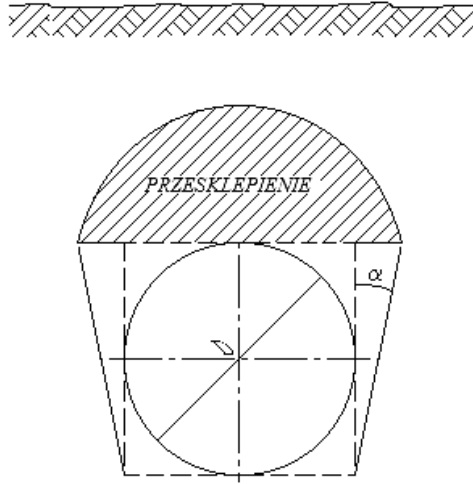
$$\sigma'_h = \gamma z \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (9)$$

$$\sigma''_h = \gamma z \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \operatorname{ctg} \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (10)$$

3. PRZESKLEPIENIE GRUNTU NAD TUNELEM WYKONANYM METODĄ BEZWYKOPOWĄ

Z osiadaniami powierzchni terenu wiąże się zjawisko przesklepiania się gruntu nad stropem tunelu. Przesklepienia występują na większych głębokościach tunelowania.

Zjawisko przesklepiania wytłumaczono po części na rysunku 3, z którego wynika, że nad obudową tunelu powstaje przesklepienie gruntu, a pod nim strefa odprężona. Na obudowę tunelu oddziałują ciśnienia statyczne w postaci ciśnień pionowych (stropowych), bocznych (na ociosy) i spągowych. Ciśnienie stropowe w tym wypadku jest równe ciężarowi gruntu w strefie odprężonej.

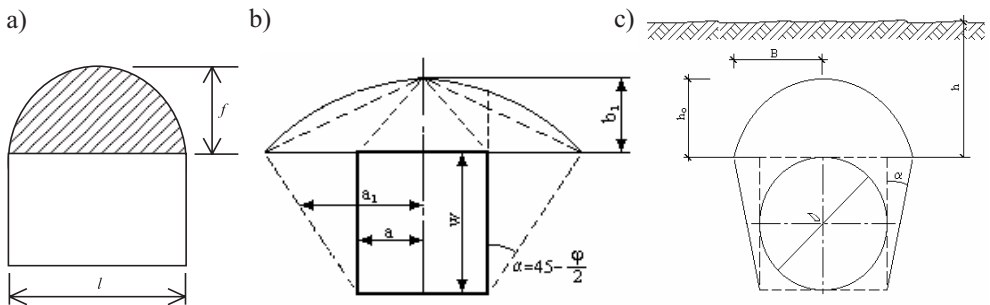


Rys. 3. Schemat przesklepienia gruntu

Mechanizm zjawiska tłumaczą teorie stosowane do obliczania ciśnień na obudowę wyrobisk korytarzowych, w tym wszelkiego rodzaju tuneli od bardzo małych przekrojów poprzecznych do wielkich.

3.1. Wzory na obliczanie wysokości przesklepienia

Na rysunku 4 przedstawiono rodzaje przesklepień i wartości charakterystyczne do obliczeń (wzory (11)–(16)) wysokości przesklepienia.



Rys. 4. Rodzaje przysklepień i wartości charakterystyczne do obliczeń: a) według Protodiakonowa; b) według Cymbariewicza; c) według Kalisza

We wzorach (11)–(16) zastosowano różne oznaczenia literowe do określania tych samych wielkości, według:

– Protodiakonowa:

$$f = \frac{l}{2 \operatorname{tg} \phi} \quad (11)$$

$$f = \frac{l}{2\mu} \quad (12)$$

– Cymbariewiczza:

$$b_l = \frac{a_1}{\mu} \quad (13)$$

$$a_1 = a + w \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (14)$$

– Kalisza:

$$h_0 = \frac{B}{f_p} \quad (15)$$

$$B = \frac{D}{2} + D \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (16)$$

gdzie:

$$\mu = \frac{1}{1000} R_c \quad (17)$$

μ – wskaźnik zwięzłości Protodiakonowa,

R_c – wytrzymałość skał na ściskanie,

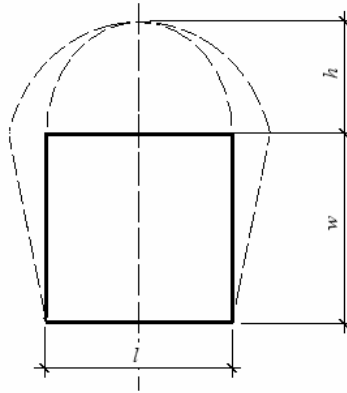
ϕ – kąt tarcia skał warstwy stopowej,

f_p – współczynnik zależny od rodzaju gruntu.

Aby porównać wzory (11)–(16) dokonano ujednoczenia oznaczeń literowych. Wyniki tego porównania przedstawiono w tabeli 1 oraz na rysunku 5.

Tabela 1
Ujednoczone wzory na wysokość przesklepienia

| Według Protodiakonowa | Według Cymbariewiczza | Według Kalisza |
|---|--|--|
| $h = \frac{l}{2 \operatorname{tg} \phi} \quad (18)$ | $h = \frac{\frac{1}{2} + w \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)}{R_c} \cdot 1000 \quad (19)$ | $h = \frac{l \cdot f_p}{2} \quad (20)$ |



Rys. 5. Ujednolicenie oznaczeń we wzorach na wysokość przesklepienia

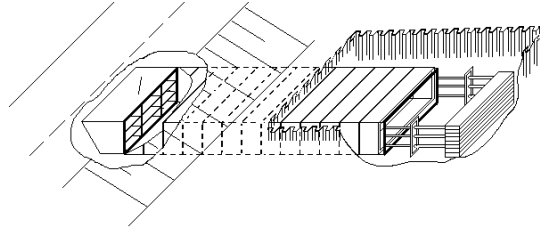
W tabeli 2 zestawiono porównanie wskaźnika zwięzłości μ i współczynnika zależnego od rodzaju gruntu f_p .

Tabela 2
Porównanie wartości wskaźników μ i f_p

| Według Protodiakonowa | | | | Według Kalisza | |
|-----------------------|-------------------------|--|---------------------------------|---|-------|
| Kategoria | Stopień twardości skały | Skała | Wskaźnik zwięzłości skały μ | Nazwa gruntu | f_p |
| VI | skały dość miękkie | łupki miękkie, wapienie bardzo miękkie, kreda, sól kamienna, gips, zmarzły grunt, antracyt, zwykły margiel, rozkruszony piaskowiec, scementowane otoczaki i grunt kamienisty | 2 | naruszony piaskowiec, łupek, margiel, glina, żwir, twarda glina, grunt zmarznięty | 2,0 |
| VIa | skały dość miękkie | grunt żwirowy, łupek rozkruszony, łupek, otoczaki zleżale i żwir, twardy węgiel kamienny, stwardniała glina, słaby kwarcyt, miękka mokra ruda żelaza | 1,5 | | |
| VII | skały miękkie | gliny zbite, miękki węgiel kamienny, aluwium, grunt gliniasty | 1,0 | zwarty ił, zwięzła glina | 1,0 |
| VIIa | skały miękkie | miękka glina piaszczysta, less, bardzo słaby kwarcyt, miękka sucha ruda żelaza | 0,8 | glina piaszczysta, less | 0,8 |
| VIII | skały ziemiste | ziemia roślinna, torf lekki, grunt gliniasty, piasek wilgotny | 0,6 | wilgotny piasek, glina piaszczysta | 0,6 |
| IX | skały sypkie | piasek, osypiska, drobny żwir, ziemia nasypa, węgiel wydobyty | 0,5 | piasek, less, drobny żwir | 0,5 |
| X | skały ciekłe | kurzawki, grunt błotnisty, less rozrzedzony i inne grunty rozrzedzone | 0,2 | namuły bagienne | 0,3 |

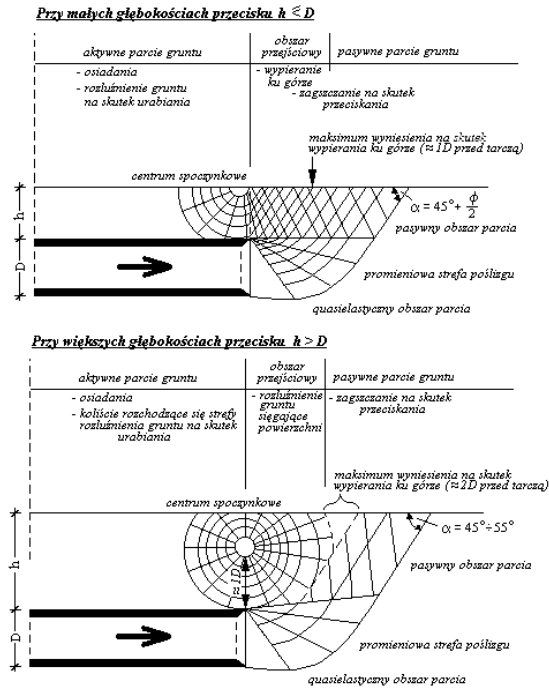
4. ODDZIAŁYWANIE TUNELOWANIA METODĄ PRZECISKOWĄ NA POWIERZCHNIĘ TERENU

Tunelowanie przeciskowe jest specyficzną technologią. Jest stosowane prawie wyłącznie w gruntach, czyli w utworach czwartorzędowych. Wraz z postępowaniem urabiania w grunt jest wciskana tarcza wraz z obudową ostateczną tunelu (rys. 6).



Rys. 6. Schemat tunelowania przeciskowego z obudową o przekroju prostokątnym

W trakcie tunelowania przed tarczą przeciskową następuje zagęszczanie gruntu oraz wypiętrzanie powierzchni terenu. Natomiast za tarczą mamy do czynienia z rozluźnianiem gruntu oraz osiadaniami powierzchni terenu. Procesy te oraz miejsce ich występowania obrazuje rysunek 7.



Rys. 7. Schematyczne przedstawienie oddziaływania tunelowania przeciskowego na otaczające środowisko

Na rysunku 7 literą D oznaczono wysokość (lub średnicę) tunelu w wylomie, literą h miąższość nadkładu nad obudową tunelu, kąt α tworzy powierzchnia terenu i krawędź strefy poślizgu (ścięcia warstw gruntu), a kąt ϕ jest kątem tarcia wewnętrznego.

Gdy $h \leq D$, to znaczy, że tunelowanie przebiega na głębokości mniejszej lub równej wysokości obudowy, a rozluźnienie gruntu sięga powierzchni terenu. Osiedlenia wystąpią na pewno w najbliższej przyszłości.

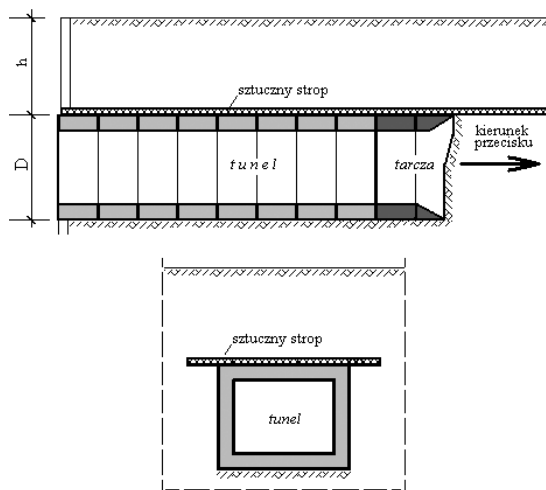
W przypadku $h > D$ tunelowanie przebiega na głębokości większej niż wysokość obudowy nad tunelem wystąpi przesklepienie utrzymujące się przez pewien czas, przeważnie do radykalnej zmiany wilgotności gruntu. Wtedy to rozluźnienie gruntu może osiągnąć powierzchnię terenu i wywołać osiadanie jego powierzchni.

5. SPOSOBY ZABEZPIECZANIA POWIERZCHNI TERENU PRZED DEGRADACJĄ WYNIKAJĄCĄ ZE STOSOWANIA METOD BEZWYKOPOWYCH

Przy niewielkich głębokościach robót jedynym skutecznym rozwiązaniem tego problemu jest oddzielenie warstw gruntu znajdujących się nad stropem tunelu od głębiej położonych. Rozwiązanie to proponuję nazwać terminem zaczerpniętym z techniki górniczej, a mianowicie „sztuczny strop”.

5.1. Sztuczne stropy stosowane przy tunelach przeciskowych o przekrojach poprzecznych prostokątnych

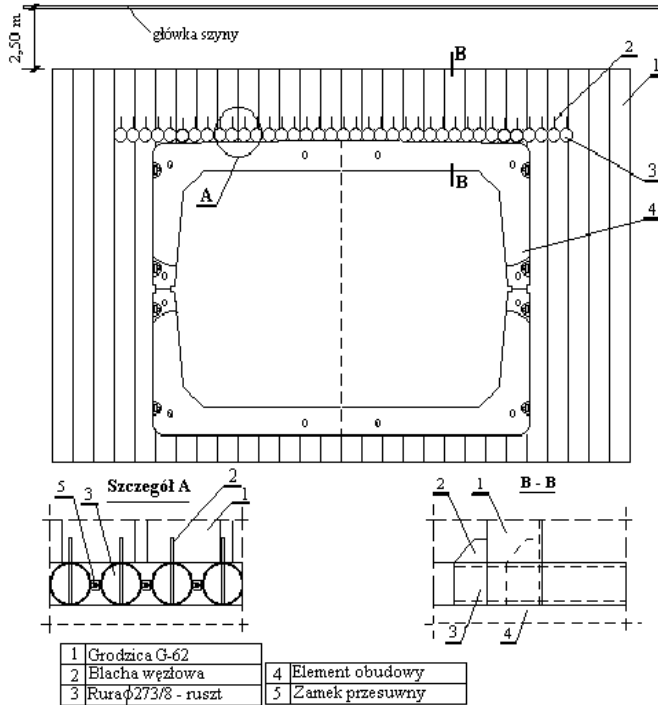
Jako przykłady posłużą zrealizowane projekty tuneli komunikacyjnych o przekrojach prostokątnych i wymiarach $9,20 \times 6,28$ m i $5,20 \times 3,25$ m w wylomie, wykonane na terenie województwa łódzkiego. Do oddzielenia warstw gruntu nad tunelem posłużono się sztucznym stropem, którego zasadę stosowania wyjaśnia rysunek 8.



Rys. 8. Zasada sztucznego stropu

Szczelny sztuczny strop (rys. 9) został wykonany z rur o średnicy 273 mm, które połączono ze sobą na całej długości zamkami wsuwanymi.

Po wykonaniu wycięcia w ścianie szczelnej szybu startowego dokonano precyzyjnych wierceń, a w otwory wsunięto rury o średnicy 273 mm. Końce rur przyspawano do ścianek szczelnych G-62 oraz ramy rozporowej w szybie startowym.



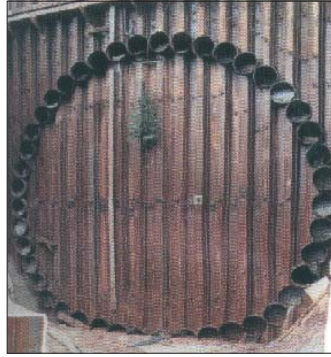
Rys. 9. Sztuczny strop z rur stalowych

Po zakończeniu tunelowania rury sztucznego stropu wypełniono betonem i pozostawiono w gruncie.

5.2. Zabezpieczanie powierzchni terenu metodą *pipe roofing*

Metoda, której nazwę można by przetłumaczyć nie tyle jako „sztuczny strop”, ale „wstępna obudowa”, składa się z dwóch etapów budowy tunelu:

1. Wykonanie obudowy wstępnej, którą stanowią rury niewielkich średnic w stosunku do projektowanego przekroju poprzecznego budowli, precyzyjnie wprowadzone na całą projektowaną długość tunelu najczęściej metodą mikrotunelowania. Rury te często łączone są ze sobą za pomocą zamków.
2. Wybieranie gruntu z przestrzeni ograniczonej obudową wstępną z jednoczesnym wciśnięciem obudowy ostatecznej. Po zakończeniu robót rury obudowy wstępnej wypełnia się betonem.

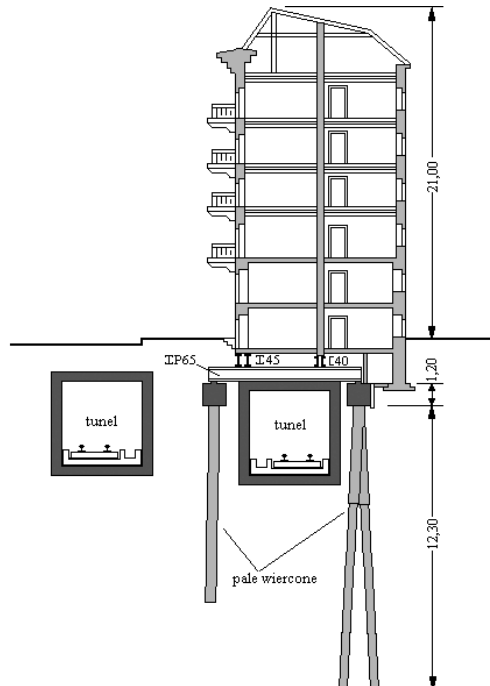


Rys. 10. Rozmieszczenie obudowy wstępnej z rur w szybie startowym tunelu

W trudniejszych warunkach geotechnicznych rury obudowy wstępnej (rys. 10) są wykorzystywane do wprowadzania instalacji mrozjącej grunt wokół przyszłego tunelu.

5.3. Przykład zabezpieczenia obiektów budowlanych przed skutkami tunelowania

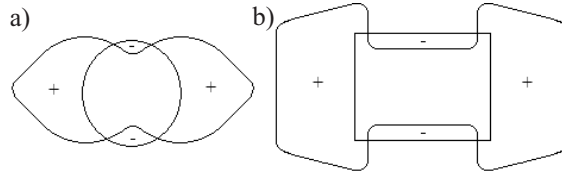
Zabezpieczenia te polegają głównie na mechanicznym wzmocnieniu konstrukcji obiektu z wykorzystaniem metod geoinżynierskich (rys. 11). Przedstawiony niżej przykład pochodzi z Niemiec.



Rys. 11. Przykład zabezpieczenia budynku, pod którym przeprowadzono tunel

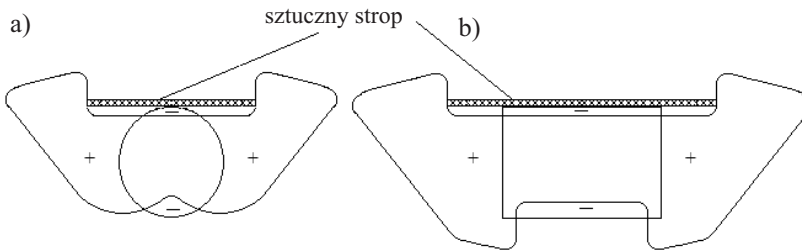
5.4. Proponowany sposób wyznaczania zasięgu sztucznego stropu w przekroju poprzecznym budowli

Rysunek 12 przedstawia prawdopodobny układ naprężeń związanych z parciem gruntu wokół wyrobiska tunelowego o przekroju poprzecznym kołowym i prostokątnym, wykonanym w gruncie jednorodnym lub zbliżonym do jednorodnego. Naprężenia pionowe ściskające oznaczono jako „-”, a poziome rozciągające jako „+”.

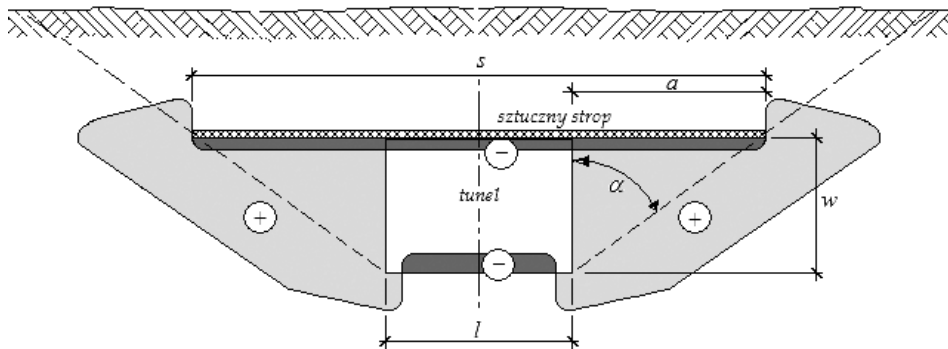


Rys. 12. Prawdopodobny układ naprężeń wokół wyrobisk tunelowych o przekroju poprzecznym: a) kołowym; b) prostokątnym; „-” naprężenia ściskające, „+” naprężenia rozciągające

Zastosowanie sztucznego stropu powoduje zmiany z rozkładzie naprężeń wokół wyrobisk. Prawdopodobnie rozkład tych naprężeń w przekroju poprzecznym tunelu będzie przedstawiał się w sposób pokazany na rysunku 13.



Rys. 13. Prawdopodobny układ naprężeń wokół wyrobisk tunelowych o przekrojach poprzecznych kołowym i prostokątnym przy stosowaniu sztucznego stropu: a) kołowym; b) tunelowym; „-” naprężenia ściskające, „+” naprężenia rozciągające



Rys. 14. Szerokość sztucznego stropu dla prostokątnego wyłomu tunelu

Zakładając wszechstronne parcie gruntu na obudowę tunelu, oraz to że parcie pionowe jest przekazywane za pośrednictwem sztucznego stropu, wówczas jego szerokość można przedstawić w sposób określony na rysunku 14.

Zależności wynikające z rysunku 14:

$$\alpha = 45^\circ - \frac{\phi}{2}$$
$$a = \operatorname{tg} \alpha \cdot w \quad (21)$$
$$s = l + 2\operatorname{tg} \alpha \cdot w$$

Stąd bezpieczna szerokość sztucznego stropu nad tunelem wynosi:

$$s = l + 2\operatorname{tg} \alpha \cdot w \quad (22)$$

$$s = l + 2\operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \cdot w \quad (23)$$

gdzie:

- s – bezpieczna szerokość sztucznego stropu,
- l – szerokość tunelu w wyłomie,
- $a = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$,
- ϕ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu,
- w – wysokość tunelu w wyłomie.

W przypadku napotkania gruntów o niewielkim zagęszczeniu, np. luźnych nasypów, wskazane jest zwiększenie szerokości sztucznego stropu.

6. WNIOSKI

- 1) Degradacja powierzchni terenu wynikająca ze stosowania metod bezwykopowych jest spowodowana zagęszczaniem gruntu przed tarczą przeciskową, rozluźnianiem gruntu za tarczą oraz powiększaniem się przesklepienia gruntu nad tunelem ku powierzchni.
- 2) Skutkiem tych zjawisk są osiadania i zapadliska powierzchni terenu.
- 3) Przyczyną zwiększania się wysokości przesklepienia nad tunelem są zmiany kąta tarcia wewnętrznego spowodowane zmianami wilgotności gruntu.
- 4) Nasilanie się tych zjawisk zwiększa się wraz ze wzrostem przekroju poprzecznego tunelu (otworu) oraz głębokością robót.
- 5) Zastosowanie sztucznego stropu jest bardzo skutecznym sposobem ochrony powierzchni terenu albowiem następuje odcięcie warstw gruntu znajdujących się powyżej linii stropu tunelu w wyłomie od warstw niższych.

- 6) Z kolei technologia sztucznego stropu ma bardzo ograniczoną długość stosowania (kilkadziesiąt metrów).
- 7) Szerokość sztucznego stropu wyznaczona z wzoru (23) obejmuje swym zasięgiem całą hipotetyczną szerokość strefy zagęszczania gruntu w skutek parcia pionowego gruntu.
- 8) Dla robót w technologiach bezwykopowych, prowadzonych na głębokościach kilku i więcej metrów wskazane jest sprawdzenie wysokości przesklepienia (najlepiej dwoma sposobami), gdyż może okazać się że stosowanie sztucznego stropu nie będzie konieczne.

LITERATURA

- [1] Borecki M., Chudek M.: *Mechanika górotworu*. Katowice, Wydawnictwo Śląsk 1972
- [2] Furtak K., Kędracki M.: *Podstawy budowy tuneli*. Kraków, Wydawnictwo PK 2005
- [3] Mandel G., Wagner H.: *Verkehrs-Tunnelbau band I*. Berlin – München, Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn 1968
- [4] Kastner H.: *Statik des Tunnel und Stollenbaues, zweite Aulage*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag 1971
- [5] Striegler W.: *Tunnelbau*. Berlin – München, Verlag für Bauwesen 1993
- [6] Kędracki M.: *Czynniki fizyczne wpływające na wielkość przesklepienia nad tunelem*. Przegląd Górniczy, 11, 2006
- [7] Kędracki M.: *Technologie bezwykopowe budowy rurociągów podziemnych*. Łódź, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 2001
- [8] Stamatello H.: *Tunele i miejskie budowle podziemne*. Warszawa, Arkady 1970
- [9] Kidybiński A.: *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Katowice, Wydawnictwo Śląsk 1987