

## Kryteria projektowania niezbrojonych warstw transmisyjnych nasypów drogowych według wytycznych ASIRI

Inż. Daniel Dalak  
Menard Polska

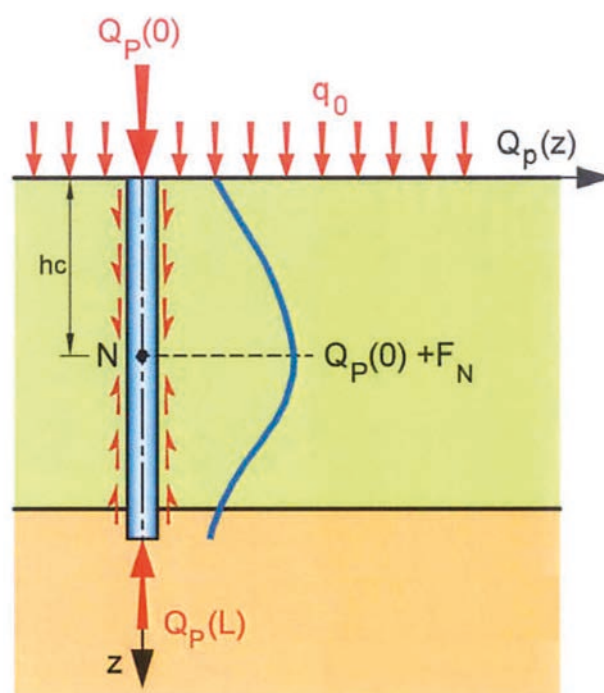
Rozwój inżynierii komunikacyjnej coraz częściej powoduje konieczność budowy dróg na obszarach występowania gruntów słabonośnych o bardzo niskiej wytrzymałości na ścinanie i dużej odkształcalności. W niekorzystnych warunkach gruntowych do bezpośredniego posadowienia nasypów drogowych są stosowane specjalistyczne metody wzmocnienia podłoża gruntowego, takie jak: kolumny betonowe (np. *Controlled Modulus Columns*, *Controlled Stiffness Columns*), kolumny *Deep Soil Mixing* i inne. Wprowadzenie w grunt materiału nośnego o zdecydowanie większej sztywności niż grunt rodzimy wiąże się z zaprojektowaniem warstwy transmisyjnej, której zadaniem jest przekazanie obciążeń z budowli ziemnej na wzmocnione podłoże oraz wyrównanie osiadania nasypu drogowego związanego z punktowym przesywnieniem podłoża, tzw. efekt „grzybków” (rys. 1).



Rys. 1. Efekt „grzybków” [1]

Warstwa transmisyjna jest zbudowana najczęściej z kruszywa naturalnego lub gruntu stabilizowanego chemicznie o wysokich parametrach mechanicznych i dużej odporności na odkształcenia. W przypadku bardzo słabych gruntów zalegających w poziomie głowic kolumn lub wysokich nasypów warstwa ta powinna być zbrojona geosyntetykami lub siatkami stalowymi. Miąższość warstwy transmisyjnej waha się przeważnie od 40 do 100 cm.

Współpracę warstwy transmisyjnej z podłożem gruntowym wzmocnionym sztywnymi lub mało podatnymi kolumnami charakteryzuje złożony mechanizm. W trakcie stopniowego przykładania obciążenia (budowa nasypu oraz obciążenie eksploatacyjne) słaby grunt oraz warstwa transmisyjna przemieszczają się w dół pomiędzy kolumnami. W górnej strefie słabego



Rys. 2. Rozkład sił w kolumnie betonowej [1]

gruntu powstaje tarcie negatywne, które maleje wraz z wzrostem głębokości (rys. 2). Na pewnym poziomie, zwanym punktem neutralnym, słaby grunt wraz z kolumną osiąga poziom równych przemieszczeń (brak tarcia na pobocznicach inkluzji). Należy zwrócić uwagę, że poziom punktu neutralnego zależy od wartości obciążenia przyjmowanego przez słabe podłoże oraz postępującej z czasem jego konsolidacji [2]. Poniżej tego punktu inkluzje osiadają więcej niż otaczający je grunt, co wywołuje tarcie pozytywne, tj. tarcie zwiększające nośność kolumny. Ważnym czynnikiem zapewniającym prawidłową współpracę warstwy transmisyjnej z kolumnami jest odpowiednia sztywność zewnętrzna kolumn. Kolumny zbyt sztywne grożą przebicciem warstwy transmisyjnej, zbyt podatne – powodują nadmierne osiadania [3].

Przedstawione rozważania odnoszą się do metody wymiarowania niezbrojonych warstw transmisyjnych nasypów drogowych lub kolejowych według wytycznych ASIRI [1]. ASIRI (Amélioration de Sols par Inclusions Rigides) to projekt badawczy przeprowadzony we Francji w latach 2005-2011 w celu usystematyzowania oraz uszczegółowienia metod projektowania oraz wykonawstwa kolumn betonowych wzmacniających podłoże gruntowe. Założenia ASIRI skorelowano z aktualnymi normami budowlanymi, tj. Eurokodami.

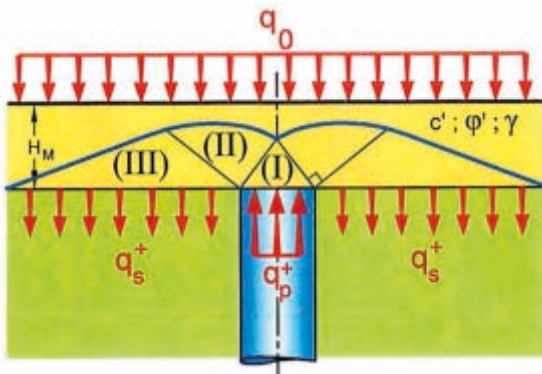
Zgodnie z zaleceniami ASIRI przy projektowaniu warstwy transmisyjnej mogą wystąpić dwa schematy zniszczenia: według teorii Prandtla lub w wyniku przebiccia. Mechanizm zniszczenia według Prandtla dotyczy przypadków, gdy warstwa transmisyjna występuje pod sztywnymi elementami (płyty, stopy lub ławy fundamentowe) oraz w wysokich nasypach. Zniszczenie w wyniku przebiccia dotyczy niskich nasypów drogowych lub kolejowych. W zaleceniach ASIRI klasyfikuje się niskie nasypy według zależności:

$$H_m = 0,7 \cdot (S - D) \quad (1)$$

gdzie:  
 $H_m$  – wysokość nasypu [m],  
 $S$  – rozstaw kolumn betonowych [m],  
 $D$  – średnica kolumn betonowych [m].

## MECHANIZM ZNISZCZENIA WEDŁUG PRANDTLA

Wymiarowanie warstwy transmisyjnej na podstawie mechanizmu Prandtla (rys. 3) opiera się na założeniach zbliżonych do zasad projektowania fundamentów bezpośrednich. W trak-



Rys. 3. Mechanizm zniszczenia według Prandtla [1]

cie obciążania w warstwie transmisyjnej nad głowicą kolumny wzrastają naprężenia ścinające, w wyniku czego tworzą się 3 strefy charakterystyczne [3]:

- Strefa I – parcie czynne według teorii Rankine’a,
- Strefa II – powierzchnia ograniczona spiralą logarytmiczną,
- Strefa III – odpór według teorii Rankine’a.

Zgodnie z przedstawioną metodą wyznacza się maksymalne naprężenie w głowicy kolumny  $q_p^+$ , które zależy od naprężenia przekazywanego na podłoże  $q_s^+$  oraz parametrów wytrzymałościowych warstwy transmisyjnej:

$$q_p^+ = s_q \cdot N_q \cdot q_s^+ + s_c \cdot N_c \cdot \frac{c'}{\gamma_{c'}} - s_\gamma \cdot N_\gamma \cdot \frac{\gamma}{\gamma_\gamma} \quad (2)$$

gdzie:

- $s_q, s_c, s_\gamma$  – współczynniki kształtu głowicy inkluzji (w przypadku okrągłych inkluzji zalecane wartości wynoszą  $s_q = 1, s_c = 1,3, s_\gamma = 0,6$  [1]),
- $\gamma_{c'}, \gamma_\gamma$  – współczynniki materiałowe przyjęte zgodnie z Eurokodem 7 (M1); w omawianym przypadku ich wartość wynosi 1,
- $N_q, N_c, N_\gamma$  – współczynniki nośności zależne od wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego  $\phi'$  materiału warstwy transmisyjnej:

$$N_q = \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_{\phi'}}{2} \right) \cdot e^{\pi \text{tg} \left( \frac{\phi'}{\gamma_{\phi'}} \right)} \quad (3)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \text{ctg} \left( \frac{\phi'}{\gamma_{\phi'}} \right) \quad (4)$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \text{tg} \left( \frac{\phi'}{\gamma_{\phi'}} \right) \quad (5)$$

gdzie:

- $\gamma_{\phi'}$  – współczynnik materiałowy przyjęty zgodnie z Eurokodem 7 (M1); w omawianym przypadku jego wartość wynosi 1.

W przypadku niskich warstw transmisyjnych oraz ze względu na to, że materiał warstwy to grunt niespoisty, wzór przyjmuje postać:

$$q_p^+ = s_q \cdot N_q \cdot q_s^+ \quad (6)$$

W celu wyznaczenia dwóch niewiadomych wartości  $q_p^+$  oraz  $q_s^+$  należy wprowadzić dodatkowe równanie uwzględniające współczynnik wymiany  $\alpha$ :

$$\alpha \cdot q_p^+ + (1 - \alpha) \cdot q_s^+ = q = q_o + \gamma_G \cdot \frac{\gamma}{\gamma_\gamma} \cdot H_m \quad (7)$$

gdzie:

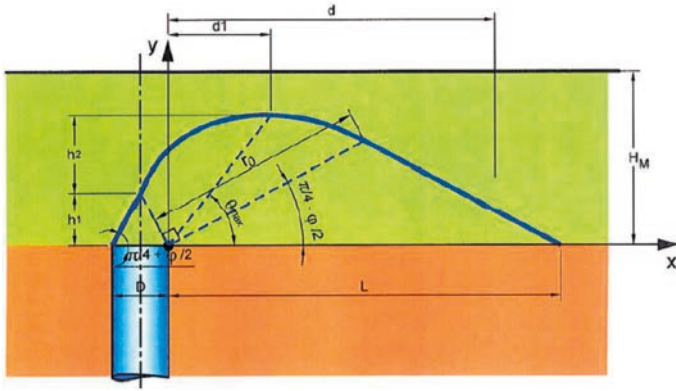
- $\alpha$  – stosunek powierzchni inkluzji do powierzchni komórki jednostkowej [-],
- $\gamma$  – ciężar objętościowy warstwy transmisyjnej [kN/m<sup>3</sup>],
- $H_m$  – wysokość warstwy transmisyjnej [m],
- $q_o$  – obciążenie działające na warstwę transmisyjną [kPa].

Rozwiązując układ dwóch równań (6) oraz (7) otrzymuje się równanie:

$$q_p^+ = \frac{N_q}{1 + \alpha \cdot (N_q - 1)} \cdot q_o^+ \quad (8)$$

$$q_s^+ = \frac{1}{1 + \alpha \cdot (N_q - 1)} \cdot q_o^+ \quad (9)$$

Bardzo ważne jest zweryfikowanie, czy dobrana miąższość warstwy transmisyjnej  $H_m$  jest wystarczająca do rozwinięcia się w pełni powierzchni ścinania. W tym celu należy skorzystać z zależności:



Rys. 4. Schemat służący do wyznaczenia miąższości warstwy transmisyjnej  $H_m$  według mechanizmu Prandtla [1]

$$h_1 + h_2 \leq H_m \quad (10)$$

gdzie:

$$h_1 = \frac{D}{2} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (11)$$

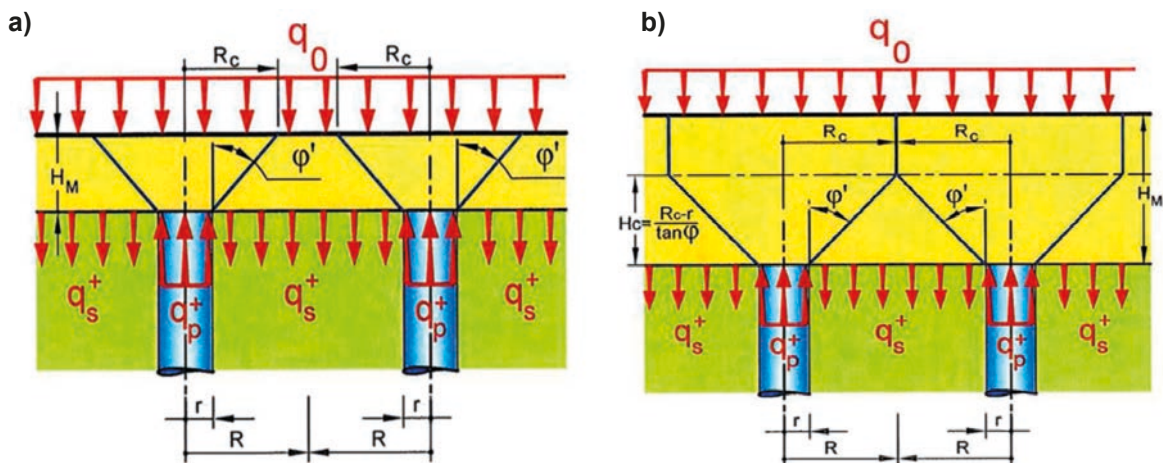
$$h_2 = r_0 \cdot e^{-\operatorname{tg}(\phi') \left[ \theta_{\max} - \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right) \right]} \cdot \sin(\theta_{\max} - h_1) \quad (12)$$

$$r_0 = \frac{D \cdot e^{\operatorname{tg}(\phi') \cdot \frac{\pi}{2}}}{2 \cdot \cos \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right)} \quad (13)$$

$$\theta_{\max} = \operatorname{tg}^{-1} \cdot \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \phi'} \right) \quad (14)$$

## MECHANIZM ZNISZCZENIA W WYNIKU PRZEBICIA

W przypadku, gdy warstwa transmisyjna nie jest ograniczona sztywnym fundamentem, można wyznaczyć dopuszczalne naprężenia w głowicy inkluzji za pomocą zależności zbliżonej do rozkładu naprężeń ścinających, stosowanej np. przy wymiarowaniu konstrukcji żelbetonowych na przebicie. W warstwach transmisyjnych kąt rozchodzenia się naprężeń ścinających jest równy wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego  $\phi'$  zgodnie z rys. 5a i 5b.



Rys. 5. Mechanizm zniszczenia w wyniku przebicia (dotyczy głównie niskich nasypów) [1]

W pierwszej kolejności należy sprawdzić, czy wysokość warstwy transmisyjnej  $H_m$  jest wystarczająca, aby strefy rozkładu naprężeń ścinających w warstwie transmisyjnej nachodziły na siebie:

$$H_c = \frac{R - r}{\operatorname{tg}(\phi')} \quad (15)$$

$$R = \frac{s}{\sqrt{\pi}} \quad (16)$$

gdzie:

$s$  – rozstaw kolumn [m],

$r$  – promień kolumny iniekcyjnej [m].

W przypadku gdy  $H_m < H_c$ , maksymalne naprężenia w głowicy kolumny  $q_p^+$  możemy wyznaczyć:

$$q_p^+ = \frac{H_m}{3} \cdot \left( \frac{R_c^2}{r^2} + 1 + \frac{R_c}{r} \right) \cdot \frac{\gamma}{\gamma_\gamma} + \frac{R_c^2}{r^2} \cdot q_0 + \frac{1}{\operatorname{tg}(\phi')} \cdot \left( \frac{R_c^2}{r^2} - 1 \right) \cdot \frac{c}{\gamma_c} \quad (17)$$

gdzie:

$$R_c = r + H_m \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\phi'}{\gamma_\gamma} \right) \quad (18)$$

W przypadku gdy  $H_m > H_c$ , maksymalne naprężenia w głowicy kolumny  $q_p^+$  wyznaczamy:

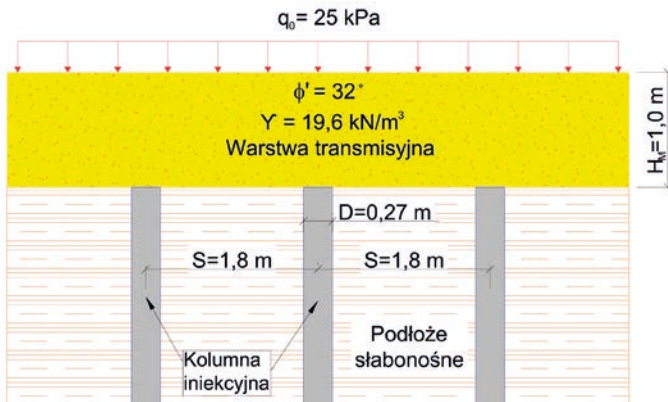
$$q_p^+ = \left[ \frac{H_c}{3} \cdot \left( \frac{R_c^2}{r^2} + 1 + \frac{R_c}{r} \right) + (H_m - H_c) \cdot \frac{R_c^2}{r^2} \right] \cdot \frac{\gamma}{\gamma_\gamma} + \frac{R_c^2}{r^2} \cdot q_0 + \frac{1}{\operatorname{tg}(\phi')} \cdot \left( \frac{R_c^2}{r^2} - 1 \right) \cdot \frac{c}{\gamma_c} \quad (19)$$

## PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

W celu pełniejszego zobrazowania metod wymiarowania warstw transmisyjnych przeprowadzono analizę obliczeniową, którą następnie zweryfikowano za pomocą metody elementów skończonych w programie Plaxis. W tabl. 1 zestawiono charakterystyczne parametry gruntowe przyjęte do obliczeń.

Całkowite obciążenia działające na podłoże gruntowe:

$$q_0 = (1,0 \cdot 19,6) \cdot 1,35 + 25 \cdot 1,5 = 64 \text{ kPa}$$



Rys. 6. Schemat obliczeniowy wzmocnionego podłoża za pomocą kolumn iniekcyjnych z warstwą transmisyjną oraz obciążeniem równomiernie rozłożonym

Tabl. 1. Wartości charakterystyczne parametrów gruntowych

Lp.	Rodzaj gruntu	Przełot warstwy [m]	$S_u$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{gr}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$M_o$ [MPa]
1.	Podłoże słaboosne	0,0 ÷ 5,0	35	12	22	5

Weryfikacja wysokości nasypu dla przyjętej geometrii wzmocnienia:

$$H_m = 0,7 \cdot (s - D) = 0,7 \cdot (1,8 - 0,27) = 1,07 \text{ m}$$

W analizowanym przykładzie wysokość nasypu wynosi 1,00 m, czyli mamy do czynienia z niskim nasypem.

## MECHANIZM ZNISZCZENIA WEDŁUG PRANDTLA

Sprawdzenie, czy powierzchnie ścinania mogą się rozwinąć:

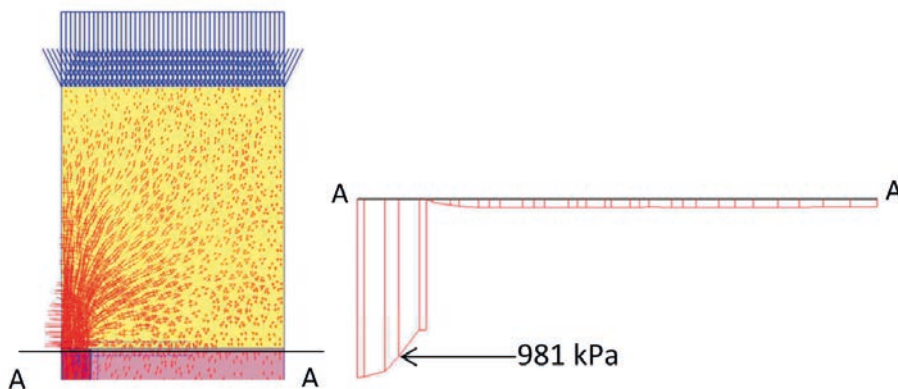
$$h_1 + h_2 \leq H_m$$

$$h_1 = \frac{D}{2} \cdot \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right) = 0,2435 \text{ m}$$

$$h_2 = r_0 \cdot e^{-\text{tg}(\phi') \left[ \theta_{\max} - \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right) \right]} \cdot \sin(\theta_{\max} - h_1) = 0,216 \text{ m}$$

$$0,2435 + 0,216 = 0,459 \leq 1$$

**Warunek spełniony**



Rys. 7. Maksymalne naprężenia w głowicy kolumny według analizy w programie Plaxis

Dopuszczalne naprężenia w kolumnie betonowej według mechanizmu Prandla:

$$q_p^+ = \frac{N_q}{1 + \alpha \cdot (N_q - 1)} \cdot q_o^+ = \frac{23,1}{1 + 0,0177 \cdot (23,1 - 1)} \cdot 64 = 1063 \text{ kPa}$$

Naprężenia w podłożu gruntowym pomiędzy kolumnami według mechanizmu Prandla:

$$q_s^+ = \frac{1}{1 + \alpha \cdot (N_q - 1)} \cdot q_o^+ = \frac{1}{1 + 0,0177 \cdot (23,1 - 1)} \cdot 64 = 46 \text{ kPa}$$

## MECHANIZM ZNISZCZENIA W WYNIKU PRZEBICIA

Wyznaczenie zasięgu promienia  $R$ :

$$R = \frac{s}{\sqrt{\pi}} = 1,02$$

Wyznaczenie zasięgu promienia  $R_c$ :

$$R_c = r + H_m \cdot \text{tg} \left( \frac{\phi'}{\gamma_{\phi'}} \right) = 0,76 \text{ m}$$

Sprawdzenie, czy strefy rozkładu naprężeń ścinających w warstwie transmisyjnej nachodzą na siebie:

$$R_c \leq R$$

$$0,76 \leq 1,02$$

**Strefy rozkładu naprężeń ścinających w warstwie transmisyjnej nie nachodzą na siebie**

Dopuszczalne naprężenia w kolumnie betonowej:

$$q_p^+ = \frac{H_m}{3} \cdot \left( \frac{R_c^2}{r^2} + 1 + \frac{R_c}{r} \right) \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{\gamma}} + \frac{R_c^2}{r^2} \cdot q_o + \frac{1}{\text{tg}(\phi')} \cdot \left( \frac{R_c^2}{r^2} - 1 \right) \cdot \frac{c}{\gamma_c}$$

$$q_p^+ = \frac{1,0}{3} \cdot \left( \frac{0,76^2}{0,135^2} + 1 + \frac{0,76}{0,135} \right) \cdot \frac{19,6}{1} + \frac{0,76^2}{0,135^2} \cdot 64 + \frac{1}{\text{tg}(32)} \cdot \left( \frac{0,76^2}{0,135^2} - 1 \right) \cdot \frac{0}{1} = 2276 \text{ kPa}$$

Naprężenia w podłożu gruntowym pomiędzy kolumnami:

$$\alpha \cdot q_p^+ + (1 - \alpha) \cdot q_s^+ = q = q_o + \gamma_G \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{\gamma}} \cdot H_m$$

$$q_s^+ = q = \frac{q_o + \gamma_G \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{\gamma}} \cdot H_m - \alpha \cdot q_p^+}{(1 - \alpha)} = \frac{64 - 0,0177 \cdot 2276}{(1 - 0,0177)} = 24 \text{ kPa}$$

## WERYFIKACJA ZA POMOCĄ METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

W celu weryfikacji otrzymanych wyników przeprowadzono analizę w programie obliczeniowym z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Obliczenia wykonano w modelu osiowo symetrycznym stosując, sprężysto-plastyczny model podłoża gruntowego z kryterium ścięcia według Coulomba-Mohra. Kolumnę wraz z otaczającym ją gruntem zamodelowano za pomocą trójkątnych elementów skończonych wraz z odpowiednimi warunkami brzegowymi w układzie osiowo-symetrycznym. Maksymalne naprężenia wyznaczono w wyniku osłabiania modułu ściśliwości do momentu utraty stateczności modelu.

### PORÓWNANIE OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Porównanie wyników przedstawiono w tabl. 2.

Tabl. 2. Porównanie wyników

Rodzaj analizy	Maksymalne naprężenia w głowicy kolumny [kPa]	Maksymalne naprężenia w podłożu gruntowym [kPa]
Prandtl	1063	46
Przebiecie	2276	24
Plaxis	981	60

Na podstawie wykonanej analizy można zaobserwować zbieżność otrzymanych wyników metodą elementów skończonych z analizą przeprowadzoną za pomocą mechanizmu Prandtla. Wartość otrzymanych naprężeń za pomocą MES-u jest niższa od 82 kPa, co koresponduje z analizami przeprowadzonymi w [1]. Różnica wynika z tego, że maksymalne naprężenia w mechanizmie Prandtla  $q_p^+$  nie zależą od ściśliwości i wytrzymałości podłoża słabonośnego. W MES-ie można lepiej odwzorować współpracę warstwy transmisyjnej, kolumn oraz podłoża. Uwzględnienie parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych podłoża słabonośnego oraz różnica w sztywności kolumn i podłoża wpływa na rzeczywisty rozkład naprężeń przenoszonych na kolumnę oraz grunt. Modelowanie numeryczne ułatwia także sprawdzenie nośności podłoża w zależności od przyjętych parametrów wytrzymałościowych. Przedstawione metody analityczne nie uwzględniają mobi-

lizacji gruntu słabego, wynikającego z osiadania kolumny, i jego zdolności do współdziałania z kolumną w przenoszeniu obciążenia zewnętrznego. Najbardziej konserwatywne wyniki otrzymano według mechanizmu zniszczenia w wyniku przebiecia. Wartość maksymalnego naprężenia w głowicy kolumny  $q_p^+$  wyniosła 2276 kPa.

### PODSUMOWANIE

Przedstawione metody wymiarowania warstw transmisyjnych opierają się na francuskich wytycznych ASIRI. Zakładają one, że dopuszczalne naprężenia w kolumnach betonowych zależą jedynie od parametrów geometrycznych i wytrzymałościowych warstwy transmisyjnej, obciążenia stałego/użytkowego oraz rozstawu i średnicy kolumn betonowych [3]. W rzeczywistości najważniejszym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę przy stosowaniu niezbrojonych warstw transmisyjnych jest wytrzymałość oraz odkształcalność słabego podłoża. Każdorazowo należy sprawdzić, czy naprężenia przekazywane na słabe podłoże nie przekraczają jego nośności oraz czy odkształcenia układu warstwy transmisyjnej i kolumn betonowych mieszczą się w granicach normowych. Wykorzystanie metod numerycznych pozwala przeprowadzić szczegółową analizę sztywnych kolumn z ośrodkiem gruntowym oraz warstwą transmisyjną. Zaletą metod numerycznych jest również możliwość oszacowania odkształcenia górnej warstwy nasypu drogowego lub kolejowego, co jest szczególnie ważne w przypadku niskich nasypów.

### LITERATURA

1. ASIRI National Project.: Recommendations for design, construction and control of rigid inclusion ground improvements. 1 st edition, 2012.
2. Carvajal E., Vukotić G., Sagaseta C., Wehr W.: Column Supported Embankments for Transportation Infrastructures: Influence of Column Stiffness, Consolidation Effects and Cyclic Loading. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.
3. Racinais J., Varaskin S., Yee K.: New approach to determine ultimate stress mobilisation in the interface rigid inclusion head and load transfer platform. 18th Southeast Asian Geotechnical & Inaugural AGSSEA Conference, Singapore 2013.
4. Topolnicki M.: Ryzyko związane ze wzmacnianiem gruntu za pomocą kolumn o różnej sztywności. XXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła 2013.