



GRZEGORZ WANIEK

Politechnika Śląska  
grzewan@gmail.com



SŁAWOMIR KWIECIEN

Politechnika Śląska  
Sławomir.Kwiecien@  
polsl.pl

## Analiza współpracy przyczółka mostowego z nasypem drogowym na podłożu gruntowym o małej sztywności

W praktyce inżynierskiej często zdarza się, że nasypy drogowe, a wraz z nimi przyczółki mostów, budowane są na gruntach o małej nośności i dużej odkształcalności. W takiej sytuacji konieczne jest posadowienie obiektów w sposób pośredni lub na podłożu wzmocnionym metodami geoinżynierii [4]. W przypadku obiektów mostowych zwykle praktykuje się posadowienia na konstrukcjach sztywnych (np. pale, kolumny iniekcyjne, kolumny DSM), gdy tymczasem nasypy posadawia się na podłożu wzmocnionym elementami o mniejszej sztywności (np. kolumny kamienne, żwirowe) lub bezpośrednio.

W tym ostatnim przypadku często nośność i stateczność układu „nasyp – słabe podłoże” poprawiają wbudowane w nasyp geosyntetyki, które zgodnie z [3] mają niewielki wpływ na redukcję osiadań podłoża nasypu. Może się wtedy pojawić trudność wynikająca z wystąpienia różnicy osiadań na styku drogowej budowli ziemnej z obiektem inżynierskim, w tzw. strefie przejściowej (rys. 1).

Zgodnie z normą PN-S-02205:1998 [6] osiadania podłoża nie powinny powodować deformacji profilu nawierzchni, zwłaszcza przy obiektach z mało podatnymi fundamentami. Rozporządzenie [7] precyzuje natomiast, że w miejscu styku drogowej budowli ziemnej z obiektem inżynierskim osiadanie nasypu powinno być równe osiadań obiektu inżynierskiego. W związku z tym konieczne jest również wzmocnienie podłoża pod nasypem dochodzącym do przyczółka [2]. Stosowane na najazdach płyty przejściowe mogą łagodzić skutki osiadań nasypu [2], a ich nachylenie z tego powodu nie powinno być większe niż 1:200-1:300 (w zależności od kategorii ruchu) [1].

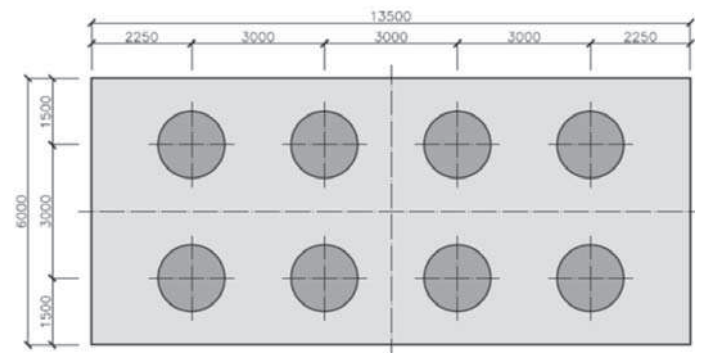
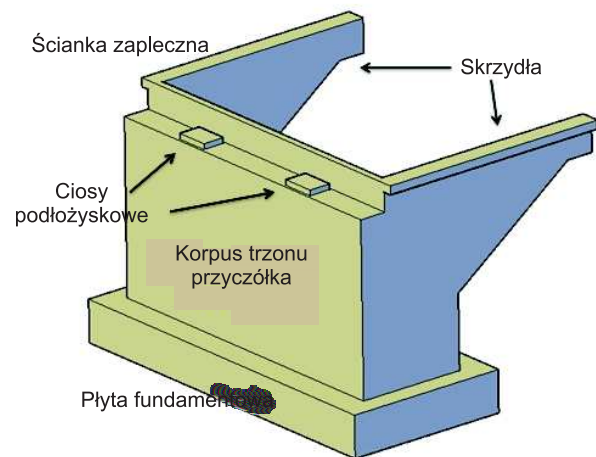
W celu zobrazowania wspomnianego zagadnienia w artykule przedstawiono analizę współpracy przyczółka mostu posadowionego w sposób pośredni, na palach wielkośredni-

cowych, z nasypem drogowym posadowionym bezpośrednio, na podłożu o małej sztywności, z uwzględnieniem jego konsolidacji. W celu uogólnienia wyników analizę obliczeniową przeprowadzono w przypadku gruntów o różnym współczynniku filtracji ( $k$ ), ale przy tych samych parametrach wytrzymałościowo-odkształceniowych. W ten sposób analizowane są grunty słabe o różnej zawartości frakcji ilastej (pyły, gliny i gliny zwięzłe) i pokazany jest ich wpływ na deformację nawierzchni na styku przyczółek-nasyp.

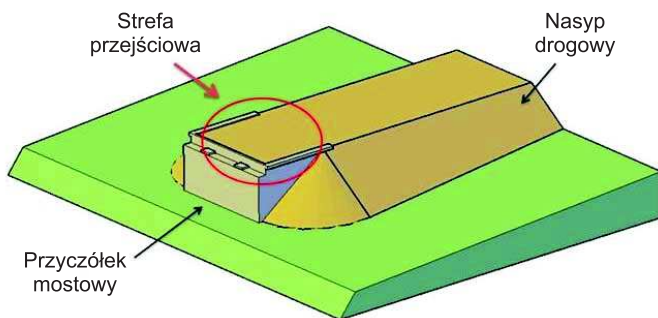
### Analiza obliczeniowa współpracy przyczółka i nasypu drogowego

#### Posadowienie przyczółka

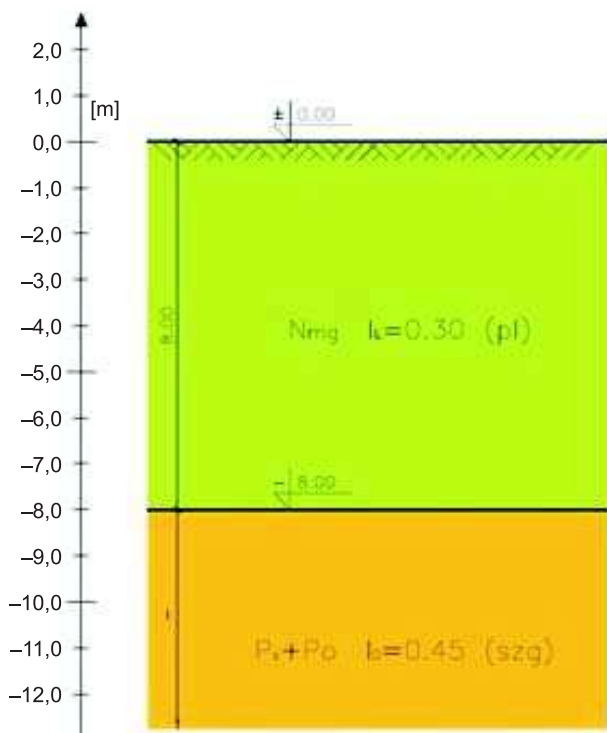
Rozpatrywany żelbetowy przyczółek mostowy składa się z płyty fundamentowej (o wymiarach  $13,0 \times 6,0 \times 1,5$  m), korpusu trzonu ( $12,0 \times 6,0 \times 1,25$  m) z uformowanym wspornikiem pod płytę przejściową, ścianki zapleczonej ( $12,0 \times 1,5$



Rys. 2. Rozpatrywany przyczółek: a) widok ogólny, b) rozstaw pali wielkośrednicowych (G. Waniek)



Rys. 1 Strefa przejściowa na styku nasyp-przyczółek (G. Waniek)



Rys. 3. Warunki gruntowo-wodne obiektów (G. Waniek)

× 0,25 m), ciosów podłożyskowych (1,2 × 0,8 × 0,3 m) oraz skrzydeł (rys. 2a). Dodatkowo za korpusem trzonu i między skrzydłami przyczółka znajduje się żelbetowa płyta przejściowa o wymiarach 10,0 × 6,0 × 0,3 m. Głębokość posadowienia przyczółka jest równa 3 m.

Do przyczółka mostowego dochodzi nasyp drogowy o wysokości 6,0 m, szerokości w koronie 12 m i nachyleniu skarp 1:1,5.

Warunki gruntowo-wodne rozpoznano na podstawie sondowań statycznych CPTU. Podłoże rozpatrywanych obiektów budują plastyczne namuły gliniaste o miąższości 8 m, podścielone średnio zagęszczonymi warstwami piasków i pospółtek (rys. 3). Jest to podłoże gruntowe często spotykane w obszarach dolin rzecznych i zbiorników wodnych.

Analiza posadowienia przyczółka wykazała, że w przypadku przedstawionych powyżej warunków gruntowych, nie jest możliwe jego bezpośrednie posadowienie, ze względu na utratę stateczności ( $F = 1,27$ ) i duże osiadania ( $s_{sr} = 14,2$  cm). W związku z tym obiekt posadowiono pośrednio na 8 wielkośrednicowych, wierconych palach, o średnicy 1,5 m i długości 15 m, wykonanych w rozstawie 3 m (rys. 2b).

## Model obliczeniowy i jego parametry

Analizę obliczeniową prowadzono w programie numerycznym Z\_Soil 2012 SE [8], metodą elementów skończonych. Zagadnienie modelowane było w układzie dwuwymiarowym, w płaskim stanie odkształcenia.

Jako model materiałowy elementów kontynuacyjnych, tj. warstw gruntu rodzimego oraz nasypowego, przyjęto model sprężysto-idealnie plastyczny o powierzchni granicznej Coulomba – Mohra i o niestowarzyszonym prawie płynięcia.

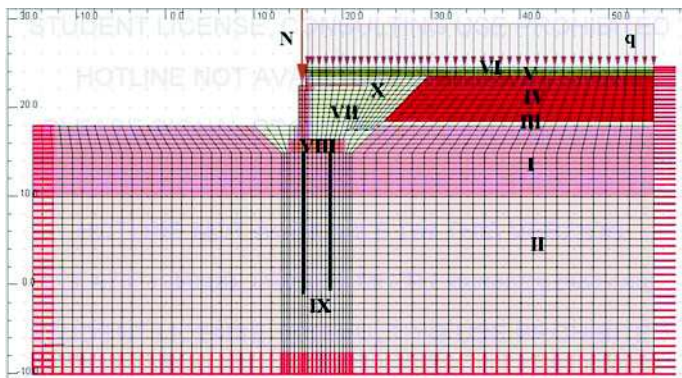
Elementy żelbetowe, asfaltobeton oraz pale (elementy belkowe) zamodelowano liniowo-sprężysto.

W analizie uwzględniono kolejność prac, tj. wykonanie wykopu fundamentowego wraz z wykonaniem pali (ok. 1 miesiąca), wykonanie korpusu przyczółka wraz z zasypką, warstwami nasypu podbudowy i asfaltu (ok. 3 miesięcy), obciążenie płytą ustroju nośnego ( $N = 250$  kN/m), oraz obciążenie ruchem ( $q = 4$  kPa).

Widok modelu przedstawiono na rys. 4, a w tabeli nr 1 zestawiono rodzaje modeli konstytutywnych zastosowanych w analizie i ich parametry.

Tabela 1. Modele konstytutywne i parametry przyjęte do analiz numerycznych

Lp.	Rodzaj	Przyjęty model konstytutywny	Parametry modelu:
1.	Warstwa I Nmg, $I_L = 0,30$	Coulomba – Mohra	$E = 5,0$ MPa, $\varphi = 10^\circ$ , $\psi = 0^\circ$ , $c = 10$ kPa, $\nu = 0,3$ , $\gamma = 19$ kN/m <sup>3</sup> , $e = 0,84$ , $k = 10^{-4} \div 10^{-8}$ cm/s
2.	Warstwa II Ps + Po, $I_D = 0,45$	Coulomba – Mohra	$E = 145$ MPa, $\varphi = 38^\circ$ , $\psi = 8^\circ$ , $c = 1$ kPa, $\nu = 0,2$ , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $e = 0,45$ , $k = 1$ cm/s
3.	Warstwa III odsączająca, Po	Coulomba – Mohra	$E = 60$ MPa, $\varphi = 41^\circ$ , $\psi = 11^\circ$ , $c = 1$ kPa, $\nu = 0,2$ , $\gamma = 18$ kN/m <sup>3</sup> , $k = 0,1$ cm/s
4.	Warstwa IV nasyp	Coulomba – Mohra	$E = 60$ MPa, $\varphi = 30^\circ$ , $\psi = 0^\circ$ , $c = 20$ kPa, $\nu = 0,2$ , $\gamma = 17$ kN/m <sup>3</sup>
5.	Warstwa V podbudowa	Coulomba – Mohra	$E = 120$ MPa, $\varphi = 40^\circ$ , $\psi = 10^\circ$ , $c = 5$ kPa, $\nu = 0,2$ , $\gamma = 19$ kN/m <sup>3</sup>
6.	Warstwa VI asfaltobeton	Linowo sprężysty	$E = 2,5$ GPa, $\nu = 0,3$ , $\gamma = 25$ kN/m <sup>3</sup>
7.	Warstwa VII zasyпка, Po	Coulomba – Mohra	$E = 60$ MPa, $\varphi = 41^\circ$ , $\psi = 11^\circ$ , $c = 1$ kPa, $\nu = 0,2$ , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup>
8.	VIII Przyczółek	Linowo sprężysty	$E = 29$ GPa, $\nu = 0,2$ , $\gamma = 25$ kN/m <sup>3</sup>
9.	IX Pale wielkośrednicowe	Element belkowy, Liniowo-sprężysty	$E = 29$ GPa, $\nu = 0,2$ , $\gamma = 25$ kN/m <sup>3</sup> , $D = 1,5$ m
10.	X Płyta przejściowa	Linowo sprężysty	$E = 29$ GPa, $\nu = 0,2$ , $\gamma = 25$ kN/m <sup>3</sup>



Rys. 4. Model numeryczny (S. Kwiecień)

Do opisu nieciągłości przemieszczeń na styku przyczółek-grunt, oraz do modelowania tarcia między gruntem a przyczółkiem zastosowano elementy kontaktowe. Przyjęto, zgodnie z normą PN-83-B-03010 [5], że wartość kąta tarcia zasypki (grunt niespoisty) o przyczółek żelbetowy jest równa wartości 2/3 kąta tarcia wewnętrznego materiału zasypki.

Kąt dylatacji, w przypadku gruntów charakteryzujących się kątem tarcia wewnętrznego powyżej 30°, przyjęto na podstawie warunku  $\psi = \varphi - 30^\circ$  [8]. W przypadku pozostałych przyjęto  $\psi = 0^\circ$ .

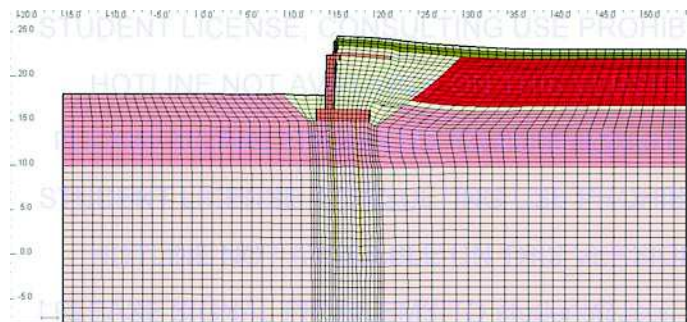
## Wyniki obliczeń i ich analiza

Przeprowadzono pięć analiz numerycznych, każdorazowo przy innym współczynniku filtracji gruntu słabego. Ich wartość zmieniała się od  $10^{-4}$  do  $10^{-8}$  cm/s, co jeden rząd wielkości. Symulowano w ten sposób różną zawartość frakcji ilowej w gruncie, tj. od gruntów pylastych ( $k = 10^{-4} \div 10^{-6}$  cm/s), przez gliniaste ( $k = 10^{-6} \div 10^{-8}$  cm/s), po gliniaste zwięzłe ( $k = 10^{-7} \div 10^{-9}$  cm/s).

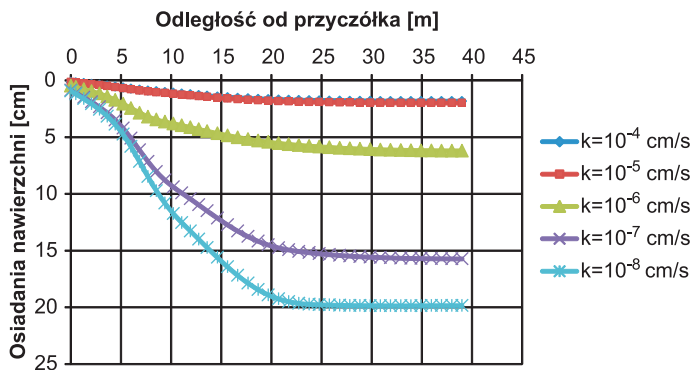
Ogólną postać deformacji układu przyczółek-nasyp po zakończeniu procesu konsolidacji, niezależną od przyjętego współczynnika filtracji, przedstawiono na rys. 5.

Aby jednak w sposób ilościowy przeanalizować przemieszczenia wspomnianego układu, na rys. 6 przedstawiono wykresy osiadań nawierzchni asfaltowej występującej bezpośrednio za przyczółkiem.

Analizując wykres można zauważyć wyraźny wpływ współczynnika wodoprzepuszczalności gruntu słabego na uzyskane wyniki. Najmniejsze osiadania nasypu i najmniejsze nachylenia strefy przejściowej uzyskano przy przyjęciu współ-



Rys. 5. Deformacja układu „przyczółek-nasyp” (S. Kwiecień)



Rys. 6. Osiadania nawierzchni strefy przejściowej, przy zmiennej wartości współczynnika filtracji ( $k$ ) gruntu słabego (S. Kwiecień)

czynnika filtracji  $10^{-4} \div 10^{-5}$  cm/s. Powodem tego jest stosunkowo szybka konsolidacja słabego podłoża (od kilku do ok. 20 dni), co powoduje, że już podczas budowy warstw nawierzchni osiadania od nasypu praktycznie uległy zakończeniu. Nachylenia strefy przejściowej wynosiły ok. 0,13% i były mniejsze od 1:300 (0,33%). W miarę zmniejszania się współczynnika filtracji, osiadania i nachylenia strefy przejściowej ulegają zwiększeniu. Przy współczynniku  $10^{-6}$  cm/s nachylenia strefy przejściowej wynosi 0,49% i spełniony jest tylko warunek nachylenia płyty przejściowej równy 1:200 (0,5%). Czas konsolidacji podłoża wynosi ok. 180 dni. W takiej sytuacji istnieje możliwość zmniejszenia nachylenia nawierzchni, np. przez wydłużenie czasu budowy nasypu za przyczółkiem. Przy współczynnikach mniejszych ( $10^{-7} \div 10^{-8}$  cm/s) nachylenia nawierzchni wynoszą odpowiednio 1,23 i 1,58% i nie spełniają wspomnianych warunków nachylenia, a czas konsolidacji przekracza 5 lat. Oznacza to, że wydłużenie w czasie budowy nasypu za przyczółkiem nie zmniejszy znacząco

Tabela 2. Zestawienie wybranych wyników obliczeń

Lp.	Współczynnik filtracji $k$ [cm/s]	Osiadania przyczółka [cm]	Maksymalne osiadania nawierzchni nasypu [cm]	Osiadania podłoża pod nasypem [cm]	Maksymalne nachylenie strefy przejściowej [%]	Długość strefy przejściowej [m]
1.	$10^{-4}$	1,15	1,83	24,14	0,12	31
2.	$10^{-5}$		1,98		0,13	32
3.	$10^{-6}$		6,20		0,49	38
4.	$10^{-7}$		15,73		1,23	38
5.	$10^{-8}$		19,86		1,58	31



osiadań i nachyleń nawierzchni, przy założeniu, że większość kontraktów trwa ok. 2-3 lat. Konieczne jest wtedy wzmocnienie podłoża pod nasypem, stopniowane (zmniejszenie rozstawów i/lub długości wzmocnienia) wraz z oddaleniem się od przyczółka lub zastosowanie metod przyspieszających konsolidację, np. przez geodreny, przeciążenie nasypu.

We wszystkich analizach nachylenie strefy przejściowej występuje na odcinku ponad 30 m.

W tabeli 2 zestawiono charakterystyczne wielkości opisujące zaistniałe deformacje w całym zakresie obliczeń. Są to osiadania przyczółka, nawierzchni, podłoża pod nasypem oraz maksymalne nachylenie strefy przejściowej i jej długość.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono problematykę deformacji stref przejściowych, występujących na styku przyczółek-nasyp drogowy, posadowionych na gruntach o małej sztywności. Pomimo jednoznacznych zapisów w rozporządzeniach i normach [6], [7] dotyczących stosowania odpowiednich rozwiązań w takich sytuacjach, niekiedy przyjmuje się, że płyty przejściowe przeniosą powstające nierównomierne osiadania. Zagadnienia takie wymagają jednak indywidualnego rozpatrywania. Konieczność wzmocnienia podłoża bądź jego wykluczenie powinno być poprzedzone analizą współpracy przyczółka z nasypem, np. w analizie MES z uwzględnieniem konsolidacji podłoża. W analizowanym przypadku wielkość deformacji wyraźnie zależała od współczynnika filtracji.

W gruntach pylastych konsolidacja przebiegała szybko, co powodowało, że w momencie układania warstw nawierzchni większość osiadań pochodzących od nasypu już wystąpiła i deformacje strefy przejściowej były niewielkie. Odmiennie zachowywały się grunty spoiste zwięzłe. Czas konsolidacji był na tyle długi, że w momencie układania nawierzchni wystąpiła tylko niewielka część osiadań całkowitych. W takiej sytuacji należy rozważyć konieczność wzmocnienia podłoża lub przyspieszenia jego konsolidacji (np. przez geodreny, przeciążenie).

## Bibliografia

- [1] G. England, N. Tsang, D. Bush: *Integral bridges. A fundamental approach to the time-temperature loading problem*. Imperial College. Highways Agency. Thomas Telford Ltd., February, 2000
- [2] K. Furtak, B. Wrańa: *Mosty zintegrowane*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005
- [3] B. Gajewska, B. Kłosiński, P. Rychlewski, K. Grzegorzewicz: *Zastosowanie geosyntetyków w budowlach ziemnych*. Studium poznawczo-techniczne, Warszawa, 2003
- [4] S. Pisarczyk: *Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
- [5] PN-83-B-03010. Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [6] PN-S-02205: 1998. Drogi samochodowe. Roboty Ziemi. Wymagania i badania
- [7] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie
- [8] Th. Zimmermann, A. Truty, K. Podleś: *Z\_Soil.PC 2012 Manual*



Katedra Inżynierii Drogowej i Dziekan  
Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska  
Politechniki Gdańskiej  
mają zaszczyt poinformować o

**sesji jubileuszowej z okazji  
70-lecia urodzin i 47-lecia pracy naukowej  
prof. dr hab. inż. Józefa Judyckiego**



**Sesja odbędzie się  
20 października 2015 roku, godz. 10.00  
w Auli Gmachu Głównego  
Politechniki Gdańskiej**

### Program:

- Otwarcie sesji - Dziekan Wydziału  
*dr hab. inż. Ireneusz Kreja, prof. PG*
  - Wystąpienie Kierownika Katedry  
Inżynierii Drogowej
  - Zarys życia i działalności Jubilata  
*doc. dr inż. Jacek Alenowicz*
  - Gratulacje i życzenia
- Przerwa kawowa (11.30 – 12.00)
- Wystąpienie Jubilata
  - Wystąpienie *Generalnego Dyrektora GDDKiA*  
*dr inż. Tomasza Rudnickiego*
  - Wystąpienie *profesora Antoniego Szydło,*  
*Politechnika Wrocławska*
  - Wystąpienie *profesora Dariusza Sybilskiego,*  
*Instytut Badawczy Dróg i Mostów*
  - Zamknięcie sesji
- Uroczysty obiad (13.30 -16.00)

