

Wzmocnienie podłoża pod małym obiektem inżynierskim i przyległym nasypem

Mgr inż. Karolina Trybocka, mgr inż. Maciej Adamiec
Menard Polska

W Polsce budowanych jest wiele nowych tras komunikacyjnych, które nie powinny sprawiać problemów w użytkowaniu. Często występujące złożone warunki gruntowe powodują potrzebę wzmocnienia podłoża pod fundamentami obiektów inżynierskich oraz pod nasypami. Technologia wzmocnienia podłoża gruntowego powinna być odpowiednio dobrana do istniejących warunków geotechnicznych. Podstawowym kryterium dotyczącym projektowania wzmocnienia podłoża na styku obiekt – nasyp jest ograniczenie różnicy osiadań, aby nie dopuścić do powstania uskoków. Dopuszczalna różnica osiadań zależy od rodzaju obiektu inżynierskiego, rodzaju nawierzchni oraz klasy drogi. Łączne analizowanie posadowienia obiektu inżynierskiego oraz nasypu drogowego, pozwoli na dobór optymalnego rozwiązania zarówno pod względem konstrukcyjnym, jak i ekonomicznym. Posadowienie obiektów inżynierskich, szczególnie w przypadku gruntów o dużej odkształcalności, jest zagadnieniem skomplikowanym [10], w którym konieczne jest spełnienie stanów granicznych zarówno nośności, jak i użyteczności. Jeden z przykładów wzmocnienia podłoża na dojeździe do wiaduktu opisano w pracy [11].

Projektanci mostowi zazwyczaj zakładają 1 cm różnicy osiadań sąsiednich podpór [7], co w praktyce sprowadza się do założenia analogicznej wartości dopuszczalnego osiadania pojedynczej podpory w fazie eksploatacji. Wymagania do projektowania nasypów są mniej rygorystyczne, zgodnie z Rozporządzeniem w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie [8], dopuszcza się osiadania nasypu w czasie eksploatacji do 10 cm. Jednocześnie osiadania podłoża nie powinny powodować deformacji profilu nawierzchni zgodnie z „PN-S 02205” [6], a w miejscu styku drogowej budowli ziemnej z obiektem inżynierskim osiadanie nasypu powinno być równe osiadaniu obiektu inżynierskiego zgodnie z wymaganiami Rozporządzenia [8]. Niestety brak konkretnych wytycznych, w których byłoby jednoznacznie określone, jaka jest dopuszczalna różnica osiadań i na jakim odcinku powinno się ją analizować. Przytoczone wymagania są bardzo ważne, ale jednocześnie trudne do spełnienia, dlatego istnieje konieczność dokładnej analizy styku obiektu inżynierskiego i nasypu. W pracy [3] przedstawiono problematykę deformacji stref przejściowych między obiektem posadowionym na palach wielkośrednicowych a nasypem posadowionym bezpośrednio.

Pod fundamentem obiektu inżynierskiego pale lub sztywne kolumny przekazują obciążenie na niżej położone warstwy gruntu. Inny schemat rozdziału obciążeń oraz osiadań z nimi związanych występuje w przypadku posadowienia nasypu na kolumnach. Wtedy część obciążeń przekazywana jest bezpośrednio na grunt między kolumnami, co generuje znacznie większe osiadania, szczególnie w przypadku, gdy grunt wokół kolumn jest bardzo ściśliwy. W konsekwencji trudno jest spełnić wymaganie osiadania nasypu rzędu 1 cm na styku z obiektem, jeżeli nasyp posadowiony jest na gruntach spoistych, w któ-

rych osiadania pochodzące od obciążeń stałych będą zachodzić w dłuższym czasie niż przewiduje harmonogram budowy drogi. Często w celu wyrównania osiadań na dojeździe do wiaduktu, przejazdu lub mostu stosuje się płyty przejściowe, które przenoszą część obciążenia na fundament obiektu [1].

Ważnym aspektem projektowania styku obiektu inżynierskiego i nasypu jest koordynacja projektów branżowych, to jest projektu mostowego oraz projektu drogowego. Poniżej przedstawiono analizę tego problemu na przykładzie przejazdu gospodarczego o przekroju skrzynkowym przy różnych wariantach posadowienia. Celem artykułu jest zwrócenie uwagi na niewłaściwe rozwiązania projektowe styku obiektu inżynierskiego oraz nasypu drogowego.

OPIS OBIEKTU I ZAŁOŻEŃ PROJEKTOWYCH

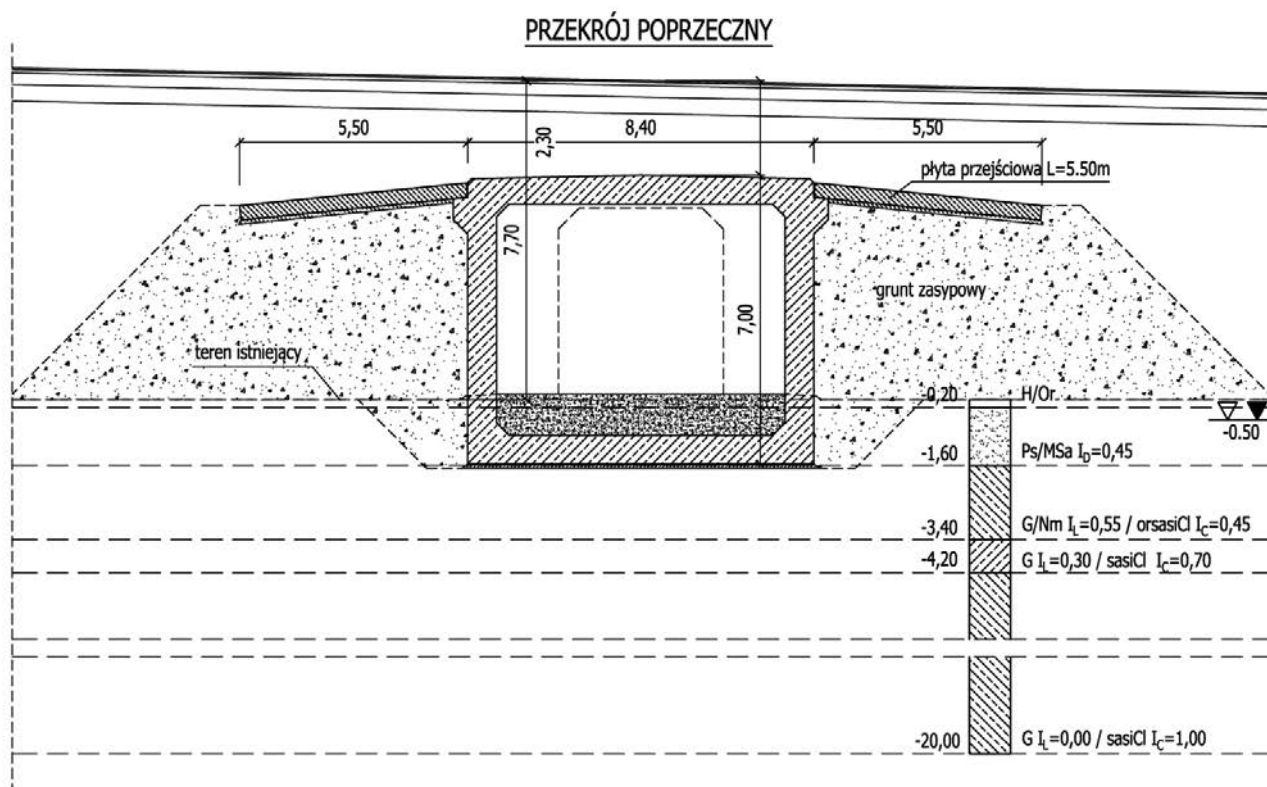
Prezentowany obiekt znajduje się w ciągu jednej z dróg ekspresowych w Polsce. Przejazd gospodarczy ma ustrój nośny ramowy zamknięty, konstrukcję monolityczną, żelbetową. Rozpiętość teoretyczna w osiach ścian wynosi 7,70 m, skrajnia pionowa w obiekcie jest równa 4,50 m, a grubości ścian, płyty dennej oraz stropu wynoszą 0,70 m. Na ścianach zaprojektowano wsporniki do oparcia płyt przejściowych. Obiekt składa się z dwóch części zdylatowanych, każda o długości 20 m. Obiekt wykonano w nasypie o maksymalnej wysokości 8 m i nachyleniu skarp 1:1,5. Układ warstw konstrukcyjnych nawierzchni przedstawiono w tabl. 1.

W projektowaniu styku obiekt inżynierski – nasyp bardzo ważną rolę odgrywa współpraca projektanta drogowego, mostowego i geotechnika. W wielu przypadkach jest tak, że w pierwszej kolejności powstaje projekt posadowienia obiektu inżynierskiego, a w późniejszym czasie projektant drogowy próbuje dobrać rodzaj wzmocnienia podłoża pod nasypem drogowym. Nie zawsze prowadzi to do rozwiązania optymalnego pod względem ekonomicznym.

W przypadku, gdy nasypy są wykonywane na podłożu, które ulega wzmocnieniu na skutek konsolidacji filtracyjnej, bardzo

Tabl. 1. Konstrukcje nawierzchni dróg na dojazdach do obiektów

Lp.	Nazwa warstwy	Grubość warstwy
1	Warstwa ścieralna	4 cm
2	Warstwa wiążąca	8 cm
3	Podbudowa zasadnicza	18 cm
4	Podbudowa zasadnicza – mieszanka niezwiązana z kruszywem (0/31,5)	20 cm
5	Podbudowa pomocnicza – mieszanka związana cementem	15 cm



Rys. 1. Przekrój podłoża i analizowanego obiektu mostowego

ważną kwestią poprawności wykonania projektu jest harmonogram oraz precyzyjne określenie faz prowadzenia robót. Brak współpracy zespołów projektowych i realizacyjnych może doprowadzić do wydłużenia czasu budowy.

WARUNKI GRUNTOWO-WODNE

Na analizowanym obszarze, bezpośrednio pod powierzchnią terenu, występują piaski średnie (MSa) średniozagęszczone o miąższości około 1,4 m. Poniżej zalega warstwa glin z zawartością części organicznych (orsasiCl) w stanie plastycznym o miąższości od 1,6 do 1,8 m, pod tą warstwą występuje gli-

na (sasiCl) twardoplastyczna do głębokości około 4,2 m p.p.t. Głębiej zalega seria glin (sasiCl) zwartych. Zwierciadło wody gruntowej stabilizuje się około 0,5 m p.p.t.

W celu uproszczenia analizy wybrano najbardziej niekorzystny przekrój geotechniczny przedstawiony na rys. 1.

Aby móc osobno rozpatrywać osiadania powstałe w fazie wykonywania nasypu i obiektu oraz w fazie eksploatacji drogi, konieczne było określenie współczynników filtracji warstw glin znajdujących się w analizowanym podłożu. Przepuszczalność gruntu określono za pomocą sondy BAT. Badania przeprowadzono w trzech profilach pomiarowych, w każdym wykonano odczyty na czterech głębokościach.

Tabl. 2. Modele konstytutywne i parametry przyjęte do analiz numerycznych

Lp.	Rodzaj	Przyjęty model konstytutywny	Parametry modelu
1	Warstwa I Pd/MSa $I_D = 0,45$	Hardening soil	$E_{\text{ref}}^{\text{ref}} = 30 \text{ MPa}$; $c = 1 \text{ kPa}$; $\phi = 30^\circ$; $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$; $k = 1,2 \text{ m/dobę}$
2	Warstwa II G/Nm $I_L = 0,55$ / orsasiCl $I_C = 0,45$	Hardening soil	$E_{\text{ref}}^{\text{ref}} = 3 \text{ MPa}$; $c = 5 \text{ kPa}$; $\phi = 23^\circ$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$; $k = 1,2\text{e-}4 \text{ m/dobę}$
3	Warstwa III G $I_L = 0,30$ / sasiCl $I_C = 0,70$	Hardening soil	$E_{\text{ref}}^{\text{ref}} = 25 \text{ MPa}$; $c = 5 \text{ kPa}$; $\phi = 25^\circ$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$; $k = 3,8\text{e-}6 \text{ m/dobę}$
4	Warstwa IV G $I_L = 0,00$ / sasiCL $I_C = 1,00$	Hardening soil	$E_{\text{ref}}^{\text{ref}} = 60 \text{ MPa}$; $c = 5 \text{ kPa}$; $\phi = 28^\circ$; $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$; $k = 1,7\text{e-}5 \text{ m/dobę}$
5	Nasyp	Mohr-Coulomb	$E_{\text{ref}}^{\text{ref}} = 80 \text{ MPa}$; $c = 1 \text{ kPa}$; $\phi = 35^\circ$; $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$; $k = 5 \text{ m/dobę}$
6	Beton	Lineral elastic	$E = 32 \text{ GPa}$; $\nu = 0,2$; $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$
7	Kolumny DR	Hardening soil	$E_{\text{ref}}^{\text{ref}} = 80 \text{ MPa}$; $c = 1 \text{ kPa}$; $\phi = 36^\circ$; $\gamma = 19,5 \text{ kN/m}^3$; $k = 8 \text{ m/dobę}$
8	DSM	Hardening soil	$E_{\text{ref}}^{\text{ref}} = 1.3 \text{ GPa}$; $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$; $k = 1\text{e-}4 \text{ m/dobę}$

ZAŁOŻENIE MODELU NUMERYCZNEGO

Analizy obliczeniowe przeprowadzono metodą elementów skończonych, w programie Plaxis 3D [5]. Założono obciążenie eksploatacyjne na nasypie o wartości 25 kPa. Jako model materiałowy warstw gruntu rodzimego przyjęto Hardening Soil pozwalający na uwzględnienie w analizie zmian sztywności w zależności od stanu naprężeń [4]. Konstrukcję żelbetową zamodelowano jako liniowo-sprężystą. W obliczeniach uwzględniono kolejność prac, to jest: wykonanie wzmocnienia podłoża wraz z realizacją obiektu inżynierskiego (2 miesiące), wzniesienie nasypu, wykonanie zasyпки wraz z płytą przejściową oraz konstrukcji nawierzchni (1 miesiąc). W tabl. 2 przedstawiono zestawienie zastosowanych modeli z podaniem ich parametrów. Elementy wzmocnienia podłoża, to jest kolumny DR i kolumny DSM, zamodelowano jako elementy objętościowe o średnicach odpowiednio 2,0 m oraz 0,8 m. Wszystkie analizy obliczeniowe były wykonywane w tych samych warunkach gruntowo-wodnych.

WYNIKI OBLICZEŃ

Pierwsze rozwiązanie wzmocnienia podłoża

W pierwszej koncepcji przyjęto posadowienie obiektu na kolumnach DSM bez wzmocnienia podłoża gruntowego pod nasypem na dojazdach. Dodatkowo uwzględniono płytę przejściową. Kolumny DSM przyjęto o długości 4,00 m i średnicy 0,80 m, w rozstawie $1,60 \times 1,60$ m. W celu wyrównania osiadań założono płyty przejściowe o długości 5,5 m. Schemat rozwiązania nr 1 pokazano na rys. 2. Kolejne ilustracje, rys. 3 oraz rys. 4, przedstawiają wyniki analizy numerycznej.

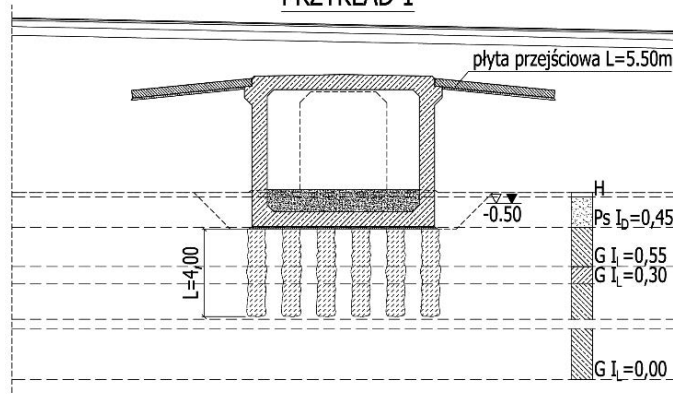
Analizując uzyskane wyniki obliczeń, stwierdzono, że wartość różnicy osiadań była wysoka i wyniosła 52 mm, a maksymalne nachylenie strefy przejściowej było równe 0,68%. Całkowite osiadanie przejazdu gospodarczego z fazy budowy obiektu, nasypu i eksploatacji wynosiło 15 mm. Rozwiązanie to jest niepoprawne, ponieważ niespełnione są wymogi równomierności osiadań. Błędne rozwiązania projektowe w tego rodzaju konstrukcjach wciąż są spotykane, mimo że problemy wynikające z nieproporcjonalnych sztywności posadowienia obiektu inżynierskiego oraz nasypu drogowego są znane [9].

Drugie rozwiązanie wzmocnienia podłoża

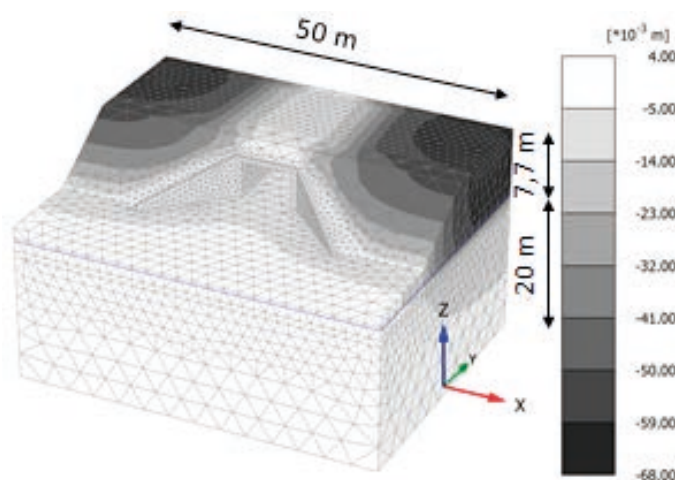
Drugie rozwiązanie było podobne do pierwszego z uwzględnieniem wzmocnienia gruntu w strefach przejściowych. Dołożono po 5 rzędów kolumn po każdej stronie obiektu, w rozstawie $1,60 \times 1,60$ m. Założono zmienny zasięg kolumn poniżej poziomu posadowienia obiektu inżynierskiego od 4,0 m – pierwszy rząd kolumn do 1,5 m – ostatni rząd kolumn. Nad kolumnami DSM przyjęto materac geosyntetyczny. Schemat rozwiązania pokazano na rys. 5. Kolejne ilustracje, rys. 6 oraz rys. 7, przedstawiają wyniki analizy numerycznej.

Analizując uzyskane wyniki obliczeń, stwierdzono, że wartość różnicy osiadań wyniosła 46 mm, ponadto maksymalne na-

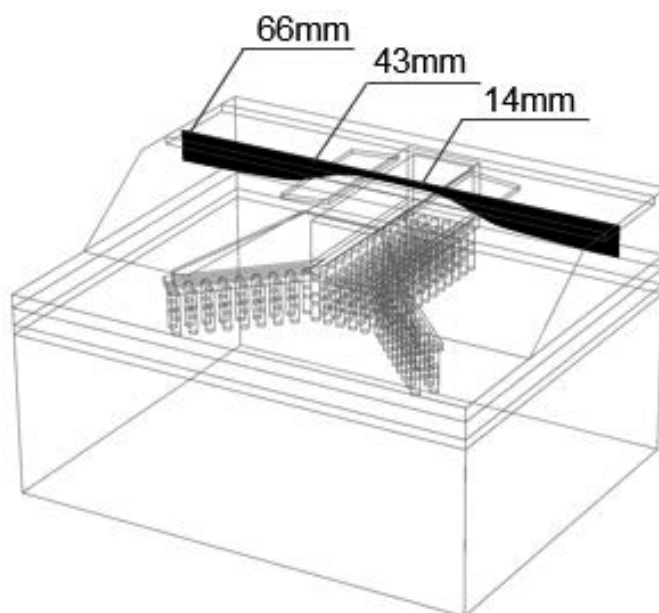
PRZYKŁAD 1



Rys. 2. Schemat wzmocnienia podłoża pod obiektem w technologii kolumn DSM

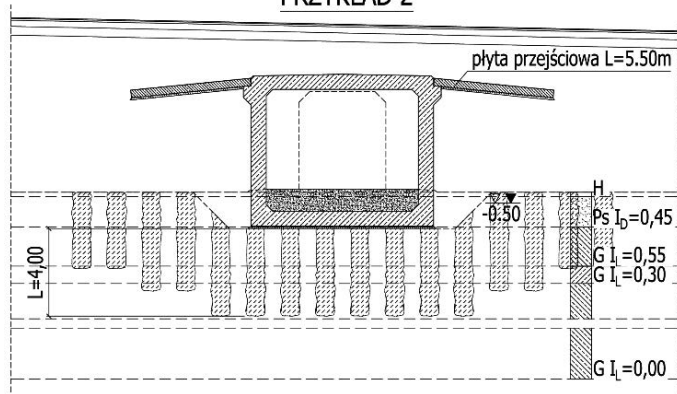


Rys. 3. Odkształcenia nasypu w etapie eksploatacji dla koncepcji projektowej nr 1

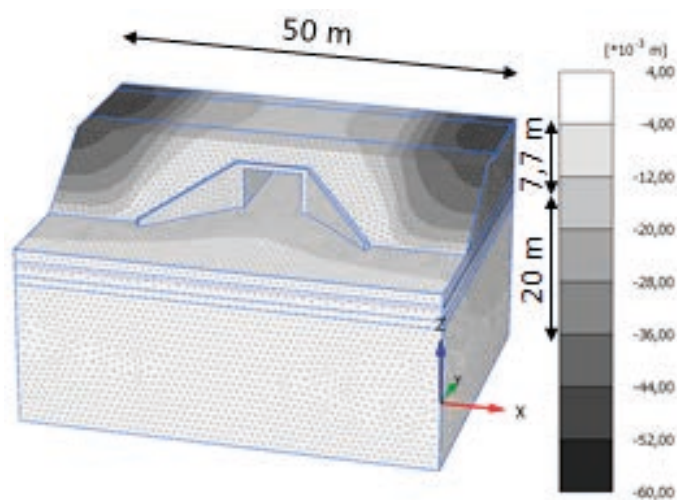


Rys. 4. Osiadania obiektu inżynierskiego i nasypu przy zastosowaniu koncepcji projektowej nr 1

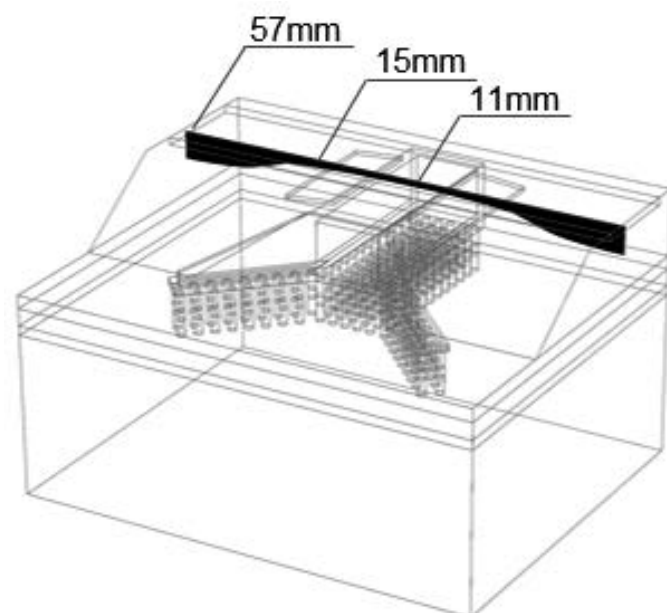
PRZYKŁAD 2



Rys. 5. Schemat wzmocnienia podłoża pod obiektem i dojazdem w technologii kolumn DSM



Rys. 6. Odkształcenia nasypu w etapie eksploatacji dla koncepcji projektowej nr 2



Rys. 7. Osiadania obiektu inżynierskiego i nasypu przy zastosowaniu koncepcji projektowej nr 2

chylenie strefy przejściowej było równe 0,62%. Całkowite osiadanie przepustu z fazy budowy obiektu, nasypu i eksploatacji wynosiło 14 mm. Rozwiązanie to wydawało się być poprawne ze względu na zastosowanie wzmocnienia podłoża na dojazdach do obiektu, jednak ze względu na wykazane duże nachylenie strefy przejściowej rozwiązanie okazało się być niewłaściwe. Z powodu dużej sztywności kolumn DSM odcinek o dużej różnicy osiadań przesunął się poza strefę wzmocnienia. Na podstawie tego przypadku można wnioskować, że należy dokładnie analizować nie tylko punkt styku nasyp – obiekt, ale również odcinek przejściowy pomiędzy odcinkiem nasypu na wzmocnionym podłożu a odcinkiem na podłożu niewzmocnionym.

Trzecie rozwiązanie wzmocnienia podłoża

W celu analizy i weryfikacji wzmocnienia podłoża za pomocą kolumn wymiany dynamicznej (DR) [2] przeanalizowano trzy kolejne modele obliczeniowe.

W trzecim rozwiązaniu założono posadowienie obiektu na kolumnach DR bez uwzględnienia płyt przejściowych oraz etapowe wznoszenie nasypu wraz z kontrolą procesu konsolidacji i monitoringiem osiadań. Na szerokości obiektu zastosowano 3 rzędy kolumn o średnicy 2 m w rozstawie 3,35 × 4,50 m. Było to rozwiązanie bez płyt przejściowych oraz bez wzmocnienia podłoża pod nasypami.

Schemat rozwiązania nr 3 pokazano na rys. 8. Kolejne ilustracje, rys. 9 oraz rys. 10, przedstawiają wyniki analizy numerycznej.

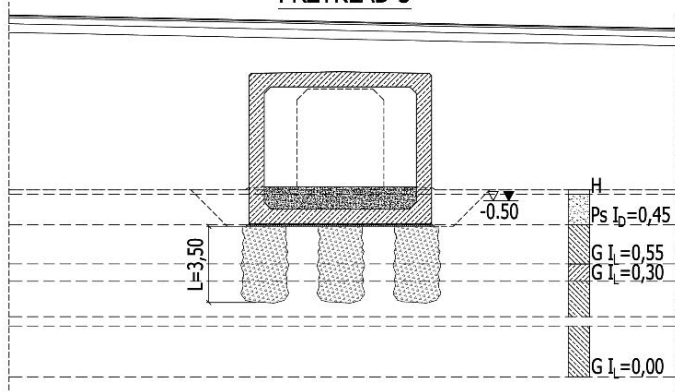
W opisywanej koncepcji projektowej, w której wymianę dynamiczną zaprojektowano w warstwie gliny w stanie plastycznym, o współczynniku filtracji pionowej $k = 1,2 \times 10^{-4}$ m/dobę, wprowadzenie materiału o zawartości frakcji pylastej poniżej 3% i współczynniku filtracji $k = 8,0$ m/dobę pozwoliło na uzyskanie stopnia konsolidacji $U = 80\%$ po założonym czasie 28 dni. W przypadku braku kolumn DR warstwa ta potrzebowałaby co najmniej 140 dni, aby uzyskać założony stopień konsolidacji. Taki okres oczekiwania znacząco wydłużyłby cały proces inwestycji.

Analizując uzyskane wyniki obliczeń, stwierdzono, że wartość różnicy osiadań wyniosła 35 mm, co jest wartością mniejszą niż w przypadku pierwszym. Jednak można zaobserwować drastyczny skok osiadania tuż za obiektem spowodowany brakiem płyt przejściowych, ponadto maksymalne nachylenie strefy przejściowej było równe 0,68%. Całkowite osiadanie przejazdu gospodarczego z fazy budowy obiektu, nasypu i eksploatacji wynosiło 33 mm. Pomimo tego, że kolumny DR są znacznie mniej sztywne od kolumn DSM, obiekt nadal miał zbyt sztywne posadowienie w stosunku do nasypu. Brak płyt przejściowych na styku obiekt – nasyp powoduje bardzo dużą różnicę osiadań, co może powodować deformację nawierzchni drogi.

Czwarte rozwiązanie wzmocnienia podłoża

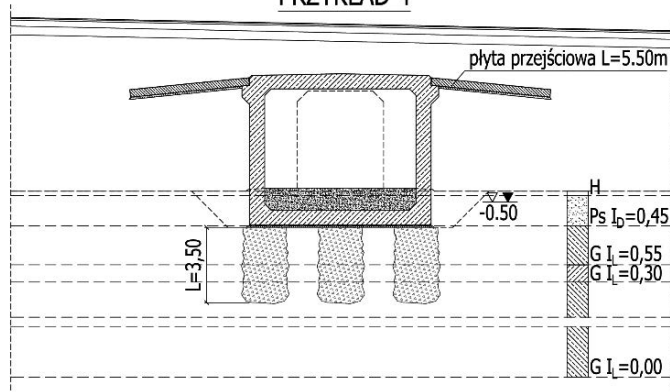
W czwartym przykładzie zastosowano rozwiązanie podobne do trzeciego, ale dodatkowo zaprojektowano płyty przejściowe. Przykład był podobny do rozwiązania pierwszego, jednak kolumny DR są bardziej podatne od kolumn DSM. Schemat roz-

PRZYKŁAD 3

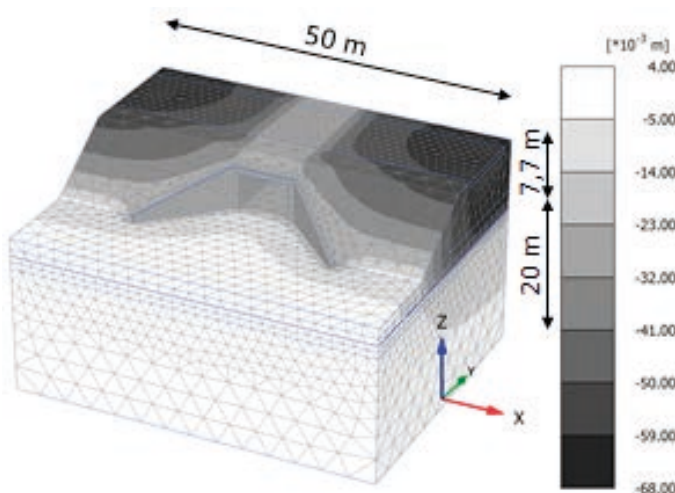


Rys. 8. Schemat wzmocnienia podłoża pod obiektem w technologii kolumn DR bez płyty przejściowej

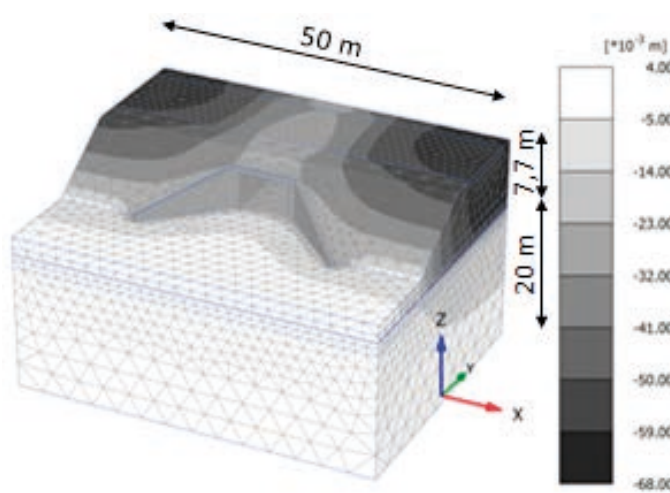
PRZYKŁAD 4



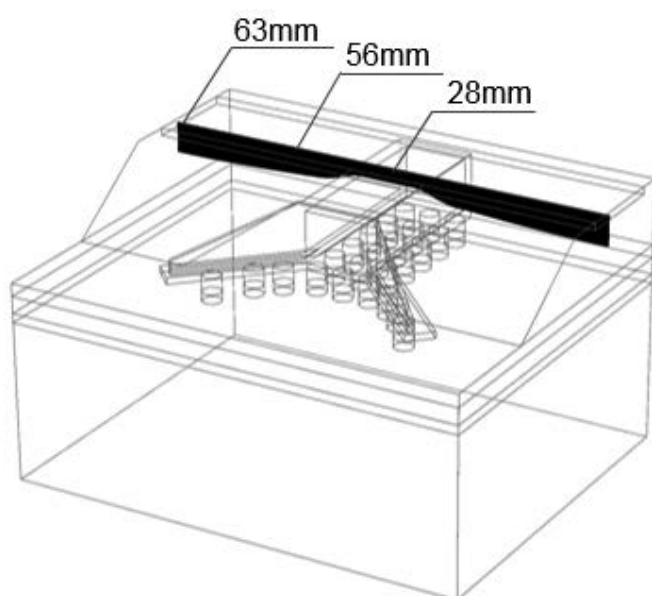
Rys. 11. Schemat wzmocnienia podłoża pod obiektem w technologii kolumn DR z płytą przejściową



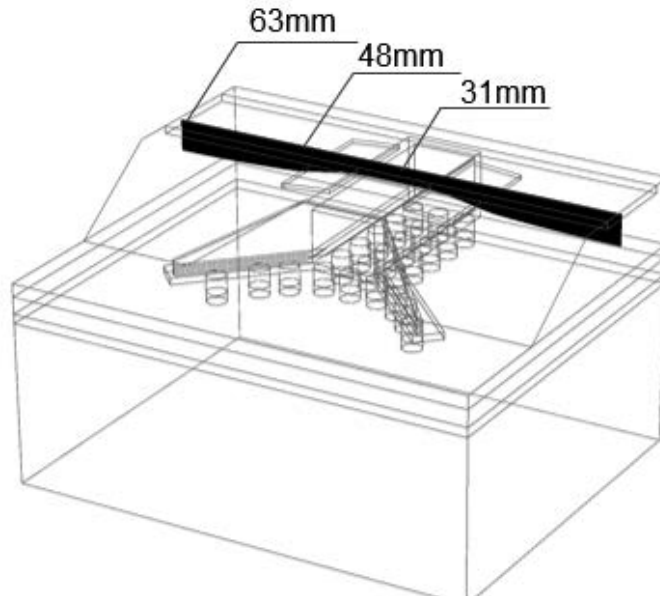
Rys. 9. Odkształcenia nasypu w etapie eksploatacji dla koncepcji projektowej nr 3



Rys. 12. Odkształcenia nasypu w etapie eksploatacji dla koncepcji projektowej nr 4

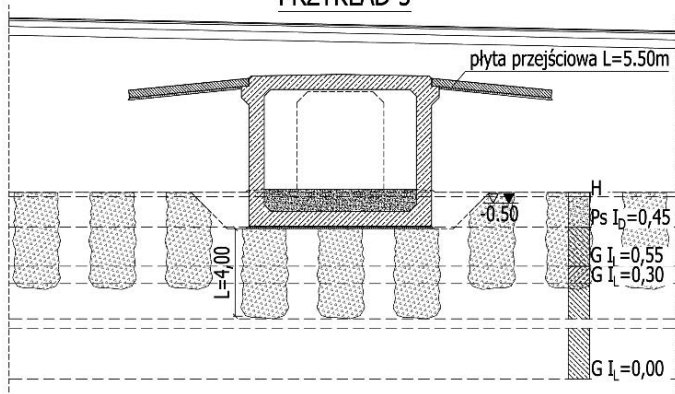


Rys. 10. Osiadania obiektu inżynierskiego i nasypu przy zastosowaniu koncepcji projektowej nr 3



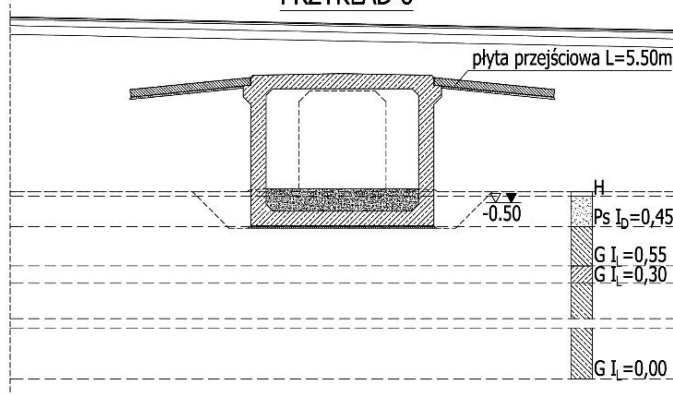
Rys. 13. Osiadania obiektu inżynierskiego i nasypu przy zastosowaniu koncepcji projektowej nr 4

PRZYKŁAD 5

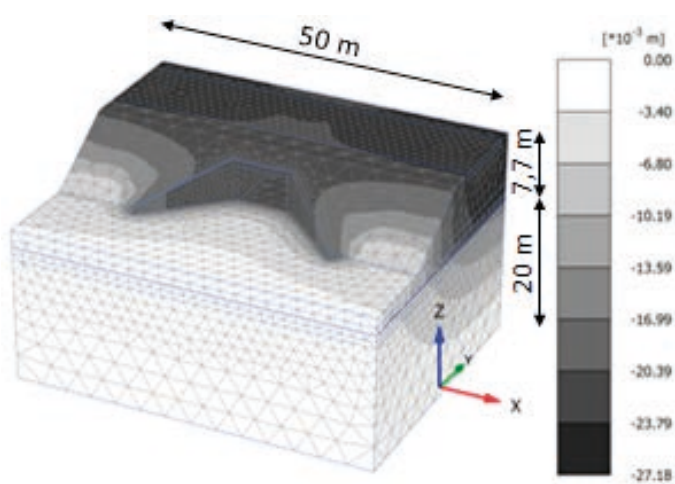


Rys. 14. Schemat wzmocnienia podłoża pod obiektem oraz dojazdem w technologii kolumn DR z płytą przejściową

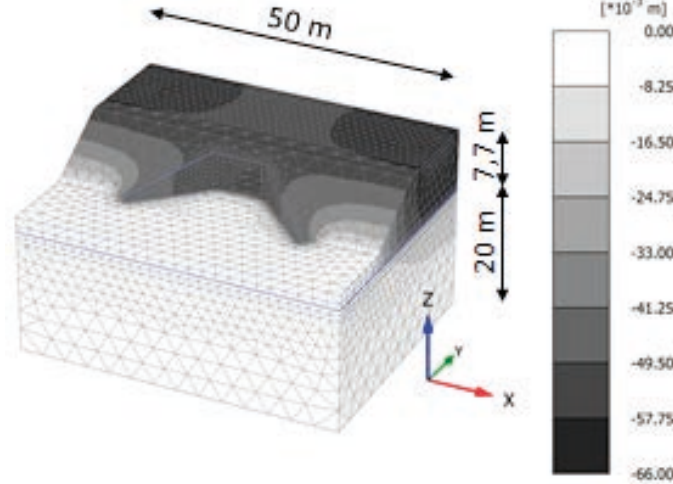
PRZYKŁAD 6



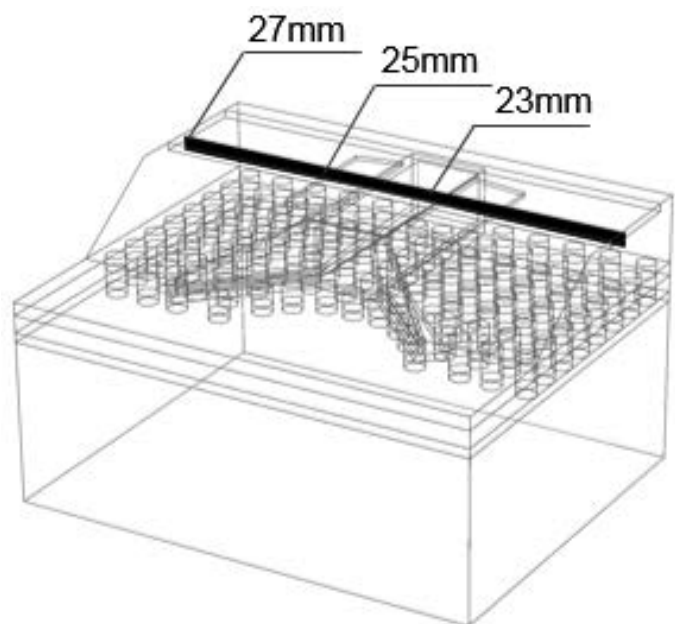
Rys. 17. Schemat posadowienia obiektu bez wzmocnienia podłoża



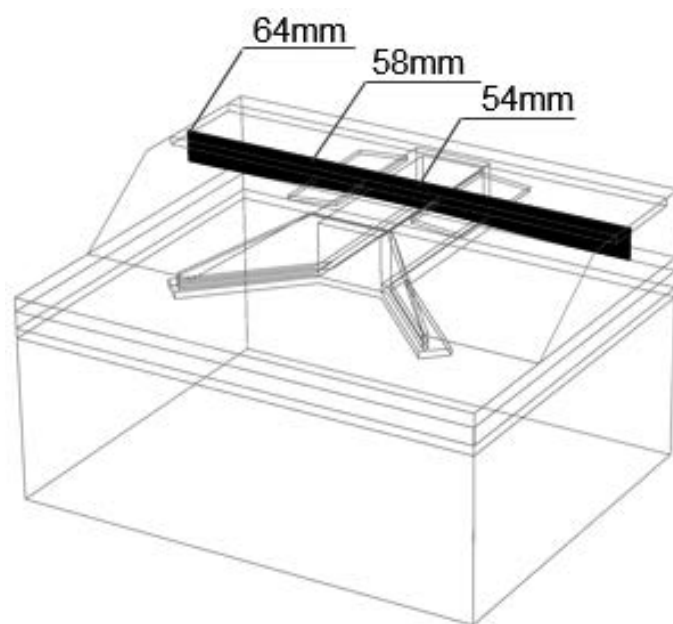
Rys. 15. Odształcenia nasypu w etapie eksploatacji dla koncepcji projektowej nr 5



Rys. 18. Odształcenia nasypu w etapie eksploatacji dla koncepcji projektowej nr 6



Rys. 16. Osiadania obiektu inżynierskiego i nasypu przy zastosowaniu koncepcji projektowej nr 5



Rys. 19. Osiadania obiektu inżynierskiego i nasypu przy zastosowaniu koncepcji projektowej nr 6

wiązania nr 4 pokazano na rys. 11. Kolejne ilustracje, rys. 12 oraz rys. 13, przedstawiają wyniki analizy numerycznej.

Analizując uzyskane wyniki obliczeń, stwierdzono, że wartość różnicy osiadań wyniosła 32 mm, co było wartością mniejszą niż w przypadku pierwszym i trzecim. Po zastosowaniu płyt przejściowych zaobserwowano mniejsze nachylenie strefy przejściowej w stosunku do rozwiązania trzeciego, którego maksymalna wartość była równa 0,37%. Całkowite osiadanie przepustu z fazy budowy obiektu, nasypu i eksploatacji wyniosło 38 mm. Pomimo niezastosowania wzmocnienia podłoża pod nasyp uzyskano znacznie mniejsze nachylenie strefy przejściowej w porównaniu do rozwiązania pierwszego. Było to spowodowane dopuszczeniem większego osiadania obiektu, to jest 31 mm (obiekt na kolumnach DSM w przypadku nr 1 osiadał 14 mm).

Piąte rozwiązanie wzmocnienia podłoża

W piątym podejściu przyjęto wzmocnienie podłoża zarówno pod obiektem, jak i pod nasypem w technologii kolumn wymiany dynamicznej DR. Schemat rozwiązania nr 5 pokazano na rys. 14. Kolejne ilustracje, rys. 15 oraz rys. 16, przedstawiają wyniki analizy numerycznej.

Analizując uzyskane wyniki obliczeń, stwierdzono, że wartość różnicy osiadań wyniosła 4 mm, ponadto maksymalne nachylenie strefy przejściowej było równe 0,02%. Całkowite osiadanie przepustu z fazy budowy obiektu, nasypu i eksploatacji wyniosło 31 mm. Dzięki zastosowaniu kolumn DR pod obiektem i całym nasypem uzyskano bardzo równomierne osiadania. Stosując wzmocnienie podłoża za pomocą kolumn DR pod nasypem, uzyskujemy bardzo małe osiadania zarówno nasypu, jak i obiektu.

Szóste rozwiązanie wzmocnienia podłoża

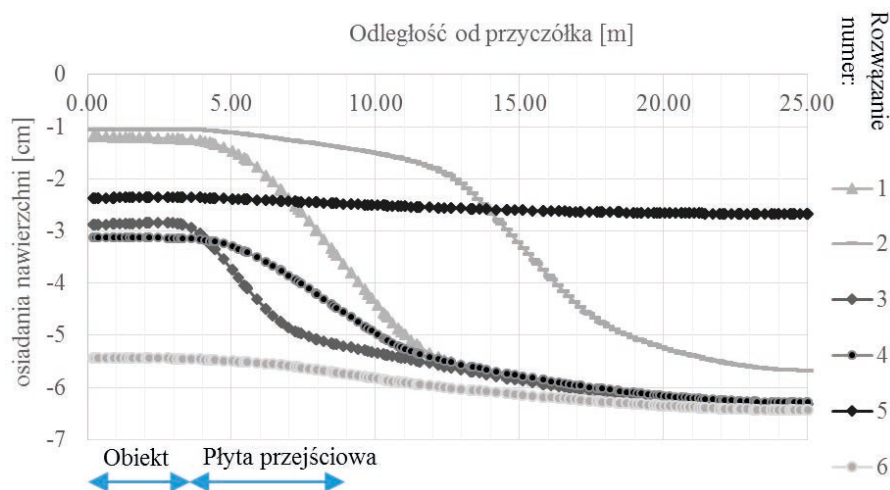
W ostatnim, szóstym podejściu założono niewykonywanie żadnego wzmocnienia kolumnami DR czy DSM, jedynie etapowe wznoszenie nasypu. Schemat rozwiązania nr 6 pokazano na rys. 17. Kolejne ilustracje, rys. 18 oraz rys. 19, przedstawiają wyniki analizy numerycznej.

Analizując uzyskane wyniki obliczeń, stwierdzono, że wartość różnicy osiadań wyniosła 10 mm, ponadto maksymalne nachylenie strefy przejściowej było równe 0,09%. Całkowite osiadanie przepustu z fazy budowy obiektu, nasypu i eksploatacji wyniosło 62 mm. Rozwiązanie to powoduje większe osiadania obiektu inżynierskiego, które dla projektanta przepustu mogą wydawać się bardzo duże, jednak dzięki temu uzyskujemy równe osiadania. W przypadku dużych osiadań nasypu i obiektu w rozwiązaniu projektowym mogą powstawać inne problemy, na przykład ze zmniejszoną skrajnią przejazdu lub ze zbieraniem się wody wewnątrz przejazdu.

ANALIZA PORÓWNAWCZA

Przedstawiony na rys. 20 wykres osiadań w okresie eksploatacji drogi dla wszystkich wariantów obliczeniowych obrazuje, które z analizowanych metod wzmocnienia podłoża dają najbardziej równomierny rozkład odkształceń w profilu drogi. Wyniki obliczeń zestawiono w tabl. 3. Rozwiązanie, w którym zastosowano kolumny wymiany dynamicznej pod obiektem, pod nasypem oraz uwzględniono płytę przejściową, nie gwarantuje najmniejszych osiadań eksploatacyjnych obiektu, ale zapewnia najmniejszą różnicę osiadań.

Brak zastosowania płyty przejściowej powoduje najbardziej niekorzystną deformację profilu drogi i dodatkowo największe ryzyko powstania uskoku, zarówno w przypadku posadowienia obiektu na kolumnach DSM, jak i przy posadowieniu na kolumnach DR. Analiza porównawcza pozwoliła stwierdzić, że kolumny DSM stanowią najbardziej sztywne podparcie dla obiektu, jednak to rozwiązanie wymusza konieczność projektowania strefy przejściowej pomiędzy nasypem posadowionym bezpośrednio na niewzmocnionym podłożu gruntowym a obiektem. Uzyskane w modelu obliczeniowym deformacje wskazują, że projektowana strefa przejściowa powinna mieć zasięg przekraczający długość płyty przejściowej. W przypadku braku wzmocnienia osiadania są bardzo równomierne, co wynika z faktu, że obciążenie od nasypu drogowego jest porównywalne do ciężaru konstrukcji przepustu skrzynkowego. Jednak takie rozwiązanie nie likwiduje problemu, ponieważ wówczas podobna różnica osiadań pojawi się na styku drogi przecinającej nasyp z przejazdem.



Rys. 20. Zależność osiadań od odległości od przyczółka

Tabl. 3. Osiadania całkowite, eksploatacyjne obiektu i nasypu

Lp.	Numer rozwiązania	Technologia wzmocnienia pod obiektem	Technologia wzmocnienia pod dojazdem	Płyta przejściowa	Osiadania całkowite obiektu	Osiadania eksploatacyjne obiektu	Osiadania eksploatacyjne nasypu	Różnica osiadań eksploatacyjnych	Największe nachylenie spowodowane osiadaniami
					[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[–]
1	I	DSM	–	+	15	14	66	52	0,68%
2	II	DSM	DSM	+	11	14	57	43	0,62%
3	III	DR	–	–	33	28	63	35	0,68%
4	IV	DR	–	+	38	31	63	32	0,37%
5	V	DR	DR	+	31	23	27	4	0,02%
6	VI	–	–	+	62	54	64	10	0,09%

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono problematykę różnicy osiadań pomiędzy obiektem inżynierskim i nasypem na gruntach ściśliwych. Na podstawie otrzymanych wyników można wnioskować, że nie zawsze zaprojektowanie płyty przejściowej rozwiązuje problem równomierności osiadań. Dla każdej strefy przejściowej należałoby przeprowadzać kompleksową analizę pod kątem konieczności wzmocnienia podłoża. W przypadku gdy posadowienie pośrednie obiektu jest niezbędne, bardzo ważne są obliczenia osiadań obiektu i nasypu. Prezentowany artykuł pokazuje, że warianty posadowienia mogą być różne i wymagają analizy możliwości ich zastosowania w określonych warunkach gruntowo-wodnych. Najważniejsze jest, aby rozwiązanie spełniało stawiane wymagania oraz żeby było ekonomiczne. W przypadku omawianych założeń projektowych, spośród analizowanych rozwiązań, przy braku czasu na konsolidację filtracyjną, najbardziej optymalnym rozwiązaniem było wzmocnienie podłoża w postaci kolumn wymiany dynamicznej. Wielkośrednicowe kolumny uformowane z materiału grubo lub bardzo gruboziarnistego nie tylko zwiększają sztywność podłoża, ale pełnią dodatkowo funkcję drenażu, co w znaczący sposób przyspiesza proces konsolidacji podłoża gruntowego.

Należy podkreślić, że przeprowadzona analiza dotyczy konkretnych warunków gruntowych i nie należy uogólniać wniosków wynikających z przedstawionych wyników obliczeń do wszystkich tego rodzaju obiektów inżynierskich.

LITERATURA

1. Binder K.: Strefa przejściowa pomiędzy obiektem mostowym a nasypem drogowym, Mosty, 4/2012.
2. Fudali J., Saloni J.: Wzmocnienie podłoża gruntowego metodą konsolidacji dynamicznej, Inżynieria i Budownictwo, 7-8/2007,
3. Kwiecień S., Waniek G.: Analiza współpracy przyczółka mostowego z nasypem drogowym na podłożu gruntowym o małej sztywności, Drogownictwo, 9/2015.
4. Obrzud R., Truty A.: The Hardening Soil model-a practice guidebook, Zace services, Ltd., 2012.
5. Plaxis 3D 2017 –Manuals. Plaxis bv, The Netherlands.
6. PN-S-02205: 1998. Drogi samochodowe. Roboty Ziemne. Wymagania i badania.
7. PN-85/S-10030 Obiekty mostowe. Obciążenia.
8. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie.
9. Rychlewski P.: Wzmacnianie podłoża a posadowienie obiektów inżynierskich, Geoinżynieria drogi mosty tunele, 01/2018 str. 42÷43.
10. Tan Y. C.: Embankment over Soft Clay – Design and Construction Control. Geotechnical Engineering, May 2005.
11. Trojnar K.: Projektowanie, budowa i monitorowanie nasypów dojazdowych do obiektów mostowych na słabym podłożu, Inżynieria Morska i Geotechnika, 3/2015.