

Infrastruktura transportowa – referat generalny

Prof. dr hab. inż. Joanna Bzówka
Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

W artykule przedstawiono zagadnienia, których tematyka wpisuje się w XVIII Krajową Konferencję Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej w sesję 4: „*Infrastruktura transportowa*”. Najczęstszymi obecnie zagadnieniami w tym zakresie są między innymi (Bzówka i in., 2015) [3]: charakterystyka słabonośnego podłoża gruntowego w budownictwie komunikacyjnym, metody wzmacniania podłoża gruntowego pod nasypami drogowymi, stabilizacje mieszanin popiołowo-żużlowych spoiwami hydraulicznymi, stosowanie materiałów odpadowych, monitoring, jak również wykorzystanie nowoczesnych narzędzi obliczeniowych do opisu współpracy konstrukcji drogowej z podłożem gruntowym.

CHARAKTERYSTYKA SŁABONOŚNEGO PODŁOŻA GRUNTOWEGO

Ze względu na fakt, że coraz częściej mamy do czynienia przy budowie dróg kołowych i kolejowych ze słabonośnym podłożem

gruntowym, w tym z gruntami organicznymi, zachodzi konieczność oceny parametrów takiego podłoża przed przystąpieniem do projektowania, a następnie do wykonawstwa w budownictwie komunikacyjnym.

W celu uzyskania parametrów modeli gruntowych, jak podają Autorzy (Bajda i in., 2018 [1]; Bajda i Skutnik, 2010 [2]; Młynarek i in., 2013 [8]), istotne jest pozyskanie wiarygodnych wartości parametrów mechanicznych analizowanych gruntów organicznych podłoża często na podstawie empirycznych zależności o charakterze regionalnym. Bajda i in. (2018) [1] przedstawili metodykę i wyniki terenowych badań geotechnicznych, trzech sondowań połową sondą obrotową FVT i czterech badań dylatometrycznych wykonanych w podłożu, zbudowanym z gruntów organicznych. Autorzy określili rozkłady wytrzymałości na ścianie bez odplywu na głębokości, jak również rozkład modułów ściśliwości torfu i gytii w trzech profilach badawczych, uzyskując w ten sposób miarodajne wartości parametrów geotechnicznych do prognozowania zachowania się podłoża organicznego pod obciążeniem. Miąższość gruntów organicznych była zmien-

na i dochodziła do 4,5 m. Wykonane w podłożu wiercenia wykazały zwierciadło wód gruntowych na głębokości od 0,2 do 1,5 m.

Jak podają Bajda i in. (2018) [1], w zależności od stopnia skomplikowania i ważności zadania geotechnicznego, rozpoznanie warunków geotechnicznych opiera się zazwyczaj na analizie wyników wierceń badawczych uzupełnionych wynikami badań laboratoryjnych parametrów fizyko-mechanicznych i badań geotechnicznych *in situ*. Niewątpliwie zaletą badań *in situ* jest to, że są one prowadzone w rzeczywistych warunkach gruntowych oraz stosunkowo szybko można uzyskać wartości poszukiwanych parametrów. Bajda i in. (2018) [1] potwierdzili swoimi badaniami i analizami, że wyniki badań *in situ* w połączeniu z ich właściwą interpretacją pozwalają uzyskać wiarygodne wartości parametrów wytrzymałościowych gruntów organicznych. Równoległe przeprowadzenie badań dylatometrycznych i sondowań połową sondą obrotową pozwoliło na uwiarygodnienie wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu, natomiast weryfikacja parametrów odkształceniowych jest możliwa, gdy opiera się na wynikach monitorowania przemieszczeń budowanego nasypu drogi. Parametry geotechniczne uzyskane z badań *in situ* mogą posłużyć do analizy stateczności oraz obliczeń konsolidacji na potrzeby zaprojektowania etapowej realizacji projektowanego nasypu z przeciążeniem.

WYBRANE METODY WZMACNIANIA PODŁOŻA POD NASYPAMI KOMUNIKACYJNYMI

Obecnie jest wiele znanych i stosowanych metod w celu wzmocnienia podłoża gruntowego, w tym do posadowienia nasypów komunikacyjnych. Do metod najczęściej stosowanych należy technologia wgłębnego zagęszczania gruntów niespoistych. W artykule Szypulskiego i Kurka (2018) [10] opisano mechanizm zagęszczenia dynamicznego gruntów niespoistych, kryteria kontroli jakości zagęszczenia wgłębnego na przykładzie posadowienia niskiego nasypu. Autorzy artykułu wskazali, że ruch pojazdów po nawierzchniach drogowych generuje powstawanie dodatkowego obciążenia dynamicznego, wywołującego powstawanie oraz przemieszczanie się w konstrukcji nasypu, jak również w podłożu gruntowym, fal objętościowych oraz fal powierzchniowych. Fale te wpływają głównie na zagęszczenie gruntów niespoistych bezpośrednio pod niskimi nasypami drogowymi, jak również rozprzestrzeniają się od źródła i mogą wpływać na sąsiadujące obiekty budowlane, czego efektem są osiadania takich konstrukcji. Wielkość powstających w gruncie fal, jak również sposób i prędkość rozprzestrzeniania się fal zależy od wielu czynników. Szypulski i Kurek (2018) [10] zaliczają do tych czynników: stopień szorstkości nawierzchni drogowej, masę pojazdu, prędkość poruszającego się pojazdu, sztywność nawierzchni, sztywność konstrukcji nasypu, warunki gruntowo-wodne podłoża. Z tego względu Autorzy potwierdzają tezę, że w przypadku posadowienia niskich nasypów drogowych na gruntach niespoistych w stanie luźnym bez przeprowadzenia analizy oddziaływań dynamicznych wywołanych ruchem jest błędem, który może skutkować zniszczeniem konstrukcji nawierzchni drogowej i niespełnieniem warunków stanu granicznego użyteczności. Potwierdzają oni także, że przyjmowanie kryterium odbioru jakości zagęszczenia podłoża gruntowego, opierając się na wartościach modułów odkształcenia E_2 i I_0 , jest

niewystarczające z powodu płytkiej strefy wpływu, która nie uwzględnia głębokości wpływu rozchodzących się w podłożu gruntowym fal. Autorzy postulują, że analiza tak postawionego problemu wymaga scharakteryzowania dodatkowych kryteriów odbiorowych podłoża gruntowego, które mogą spowodować zastosowanie takich zabiegów technicznych, za pomocą których poprawione będą parametry mechaniczne lub odkształceniowe warstwy gruntu niespoistego w zakresie oddziaływań dynamicznych. W przypadku konieczności zastosowania technologii zagęszczania wgłębnego ważnym elementem jest znajomość mechanizmu zagęszczania dynamicznego gruntów niespoistych w zależności od użytej technologii, a także wpływ tego mechanizmu na parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe podłoża, które odgrywają istotną rolę w interpretacji parametrów gruntu zagęszczonego.

Kolejnym sposobem wzmocnienia podłoża gruntowego, tym razem podłoża organicznego nasypów, jest kontrolowana konsolidacja podłoża podczas etapowej realizacji nasypu z przeciążeniem z zastosowaniem drenażu pionowego i geowłókniny. Lechowicz i in. (2018) [6] potwierdzili taką możliwość na przykładzie projektowania wzmocnienia podłoża drogi ekspresowej S5, częściowo zlokalizowanej na trasie istniejącej drogi krajowej, w której podłożu występują ekstremalnie trudne warunki geotechniczne. Nasyp ma zmienną wysokość wynoszącą maksymalnie 12 m. Na koronie o szerokości 33 m zaprojektowano dwie dwupasmowe jezdnie z pasem awaryjnym o szerokości 9,5 m, każda z pasem rozdzielającym o szerokości 12 m. Projektowane obciążenie nawierzchni wynosi 115 kN/oś, przy natężeniu ruchu KR6. W analizowanym przez Lechowicza i in. (2018) [6] podłożu gruntowym występują grunty organiczne – torfy i gytia o miąższości 4,5 m.

Do analizy stateczności i prognozy konsolidacji Autorzy wykorzystali programy GeoSlope i Plaxis, określając bezpieczne wysokości poszczególnych etapów budowy nasypu i czas potrzebny do konsolidacji podłoża. Przeprowadzone przez Autorów analizy numeryczne wykazały strefy nierównomiernych osiadań wymagających dodatkowego wzmocnienia korpusu i skarp nasypu. W analizie stateczności nasypu przyjęto cztery etapy budowy nasypu, każdy o wysokości 3 m i etap przeciążenia o wysokości 2 m. Wysokość nasypu z przeciążeniem wynosiła zatem 14 m. Czas realizacji każdego etapu wynosił 60 dni, przy czym Lechowicz i in. (2018) [6] założyli, że wznoszenie nasypu trwało 18 dni, natomiast przerwa technologiczna 42 dni. W obliczeniach przyjęto również wzmocnienie konsolidacyjne podłoża organicznego przyspieszone drenażem pionowym o rozstawie 1,5 m i zbrojenie podstawy nasypu geowłókniną. Jak udowodnili Autorzy opracowania, uwzględniając konsolidacyjne wzmocnienie podłoża i zbrojenie podstawy nasypu, wyniki analizy stateczności wskazują na stateczny stan poszczególnych etapów przy przyjętym harmonogramie budowy nasypu.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że przeprowadzone przez Lechowicza i in. (2018) [6] badania laboratoryjne torfu i gytii wykazały, że w procesie konsolidacji wraz ze zmniejszeniem wskaźnika porowatości maleje współczynnik konsolidacji. W celu poprawnego uwzględnienia tego faktu, w analizie numerycznej wykorzystującej model sprężysto-idealnie plastyczny, wymaga się odpowiedniego zwiększenia modułu odkształcenia oraz zmniejszenia współczynnika filtracji w poszczególnych etapach wznoszenia nasypu. Co jest równie ważne, Autorzy wy-

ciągnęli z analiz wnioski, że nadwyżki ciśnienia wody w porach gruntu występują również poza podstawą nasypu, co uzasadnia konieczność zainstalowania drenażu pionowego poza nasypem w strefie o szerokości 4,5 m.

Zróżnicowane właściwości podłoża organicznego oraz różna lokalizacja projektowanego nasypu w stosunku do nasypu istniejącego powodują konieczność zainstalowania aparatury kontrolno-pomiarowej. Wyniki pomiarów aparatury kontrolno-pomiarowej pozwalają na ocenę rzeczywistego przebiegu procesu wzmocnienia i podjęcie odpowiednich decyzji.

Przykład innego sposobu wzmocnienia podłoża gruntowego pod nasyp drogowy przedstawiono w pracy Sołtysa i Brzozowskiego (2018) [9]. Pod nasypem drogowym przy obiekcie mostowym, będącym jednocześnie przejściem dla zwierząt, wybudowanym w ciągu obwodnicy miejscowości Stawiski na drodze krajowej S-61 na odcinku Łomża-Budzisko. Nasyp posadowiono na kolumnach przemieszczeniowych CSC (*Controlled Stiffness Columns*) o średnicy 0,36 m. W celu poprawnego przeniesienia obciążeń na kolumny i podłoże pod nasypem zaprojektowano platformę transmisyjną LTP (*Load Transfer Platform*) o miąższości 0,5 m, ze zbrojeniem w postaci siatki z ocynkowanych prętów stalowych o średnicy 10 mm. Program monitoringu, którego głównym celem była obserwacja zaprojektowanego i wykonanego sposobu posadowienia nasypu drogowego, obejmował następujące pomiary (Sołtys i Brzozowski, 2018) [9]: siły w siatce stalowej, rozkład składowej pionowej naprężenia w kolumnie i podłożu pomiędzy kolumnami, osiadania podstawy nasypu, przemieszczenia poziome i odkształcenia siatki stalowej, siły wewnętrzne w skrajnej kolumnie CSC.

W artykule Autorzy, oprócz przedstawienia szczegółowych wyników monitoringu, przedstawili analizę wsteczną MES zachowania się konstrukcji posadowienia nasypu, opierając się na danych pomiarowych z długookresowego pomiaru (4 lat), pozwalającą na weryfikację doboru odpowiednich modeli konstytutywnych i metodyki obliczeń tego rodzaju konstrukcji. Model ogólny 3D wykorzystano do prognozy osiadania nasypu oraz określenia przemieszczeń elementów wzmocnienia, to jest kolumn betonowych, siatki stalowej oraz do oceny sił wewnętrznych w elementach betonowych. Model szczegółowy 2D opracowano głównie do oceny rozdziału obciążenia pomiędzy elementami betonowymi, gruntem i siatką stalową. Autorzy wykonali ogólny model obliczeniowy 3D dla wycinka nasypu obejmującego 3 rzędy kolumn betonowych, których długości przyjęto z automatycznego zapisu parametrów produkcyjnych kolumn. Elementy betonowe zamodelowano elementami strukturalnymi, typu „*embedded beam*” (Plaxis 3D), które nie wpływają na kształt siatki MES i nie wymagają złożonej kalibracji. Model szczegółowy oparto na układzie osiowosymetrycznym z Plaxis 2D. W modelu tym Autorzy zagęścili siatkę w strefach szczególnie istotnych z punktu widzenia rozdziału obciążenia; to jest nad głowicą kolumny, w obszarze mobilizacji efektu przesklepienia oraz wzdłuż pobocznic kolumny. Element betonowy zamodelowano elementem objętościowym, o charakterystyce materiałowej liniowo sprężystej z elementem kontaktowym umożliwiającym redukcję wytrzymałości i sztywności gruntu w płaszczyźnie styku elementu betonowego i gruntu.

Do opisu ośrodka gruntowego poniżej poziomu posadowienia nasypu, dla wszystkich warstw podłoża, wykorzystano model Hardening Soil (Plaxis 2D, 3D). W obliczeniach MES Auto-

rzy uwzględnili odpowiednie mobilizowanie wysokości nasypu i obciążenia użytkowe nasypu w każdym kroku czasowym, wraz z równoczesnym prowadzeniem obliczeń konsolidacji podłoża gruntowego. Należy dodać, że podłoże gruntowe jest zbudowane ze słabych warstw gruntów organicznych – torfów i gytii i namulów o znacznych miąższościach.

Analiza wsteczna wykazała otrzymanie zadowalającej zbieżności wyników z pomiarami. Zaproponowana przez Sołtysa i Brzozowskiego (2018) [9] metodyka obliczeń w dużej mierze potwierdziła swoją skuteczność, pomimo przyjęcia w obliczeniach relatywnie prostych modeli konstytutywnych, których parametry oszacowano na podstawie standardowego rozpoznania geotechnicznego bez zaawansowanych badań laboratoryjnych.

WYBRANE MATERIAŁY ODPADOWE STOSOWANE W BUDOWNICTWIE KOMUNIKACYJNYM

Z racji wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej opartej na paliwach stałych, takich jak węgiel kamienny i brunatny, powstają odpady poenergetyczne, w tym popioły lotne, żużle paleniskowe i mieszaniny popiołowo-żużłowe. Obecnie wzrasta ilość wykorzystywanych odpadów poenergetycznych, zwłaszcza w przemyśle materiałów budowlanych, jak również w inżynierii lądowej, szczególnie w budownictwie komunikacyjnym (Zawisza i in., 2018) [11].

Grunty stosowane do budowy nasypów ziemnych muszą charakteryzować się odpowiednimi parametrami geotechnicznymi w celu zapewnienia warunków stateczności i nośności. W przypadku, gdy grunty nie wykazują odpowiednich właściwości geotechnicznych można polepszyć ich parametry poprzez stabilizację. Wśród licznych spoiw stosowanych do stabilizacji, takich jak: cement, wapno, spoiwa hydrauliczne Zawisza i in. (2018) [11] przedstawili możliwości stabilizacji mieszanin popiołowo-żużłowych spoiwami hydraulicznymi.

Przedmiotem badań i analiz Zawiszy i in. (2018) [11] była mieszanina popiołowo-żużłowa pochodząca ze składowiska Elektrociepłowni Kraków (EDF Polska S.A.), dawniej Elektrociepłowni „Łęg”. Mieszanina stanowi uboczne produkty spalania węgla kamiennego i była składowana na sucho. Celem badań było określenie wytrzymałości na ściskanie oraz mrozoodporności mieszaniny stabilizowanej spoiwami hydraulicznymi. Badania Autorów były przeprowadzone w aspekcie możliwości wykorzystania mieszaniny popiołowo-żużłowej do celów budownictwa drogowego. W artykule (Zawisza i in. (2018) [11] zebrano wyniki badań mieszaniny popiołowo-żużłowej pobieranej ze składowiska w różnym czasie i stabilizowanej cementem portlandzkim klasy 32,5R oraz wapnem hydratyzowanym, Solitexem i Terramixem F22,5 oraz ponownie cementem i wapnem. W przypadku mieszaniny popiołowo-żużłowej Autorzy oznaczyli parametry zagęszczalności z dodatkiem 3%, 6% i 8% odpowiedniego spoiwa w stosunku do suchej masy materiału. Badania obejmowały określenie podstawowych parametrów geotechnicznych oraz wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dobach pielęgnacji oraz po 28 dobach pielęgnacji próbek poddanych cyklowi zamrażania i odmrażania.

Po przeprowadzeniu wszystkich badań, analiz wyników i porównań, Zawisza i in. (2018) [11] podali następujące wnioski: zróżnicowanie uziarnienia badanej mieszaniny popiołowo-żu-

lowej pochodzącej z różnych części składowiska i o różnym okresie zalegania było stosunkowo nieduże i wynosiło do około 9% w przypadku frakcji grubszych (żwirowej i piaskowej) i do 4% w przypadku frakcji drobniejszych (pyłowej i ilowej). Wyniki stabilizacji prowadzonej z użyciem różnych spoiw hydraulicznych wykazały między innymi, że najbardziej skutecznym spoiwem jest cement – dodatek 6% cementu do mieszaniny popiołowo-żużlowej kwalifikuje tę mieszaninę do materiałów przydatnych na podbudowę zasadniczą lub pomocniczą nawierzchni drogowej oraz na górne warstwy nasypów w strefie przemarzania. Mniej skutecznym spoiwem jest wapno hydratyzowane – dodatek 3% tego spoiwa do mieszaniny popiołowo-żużlowej kwalifikuje tę mieszaninę do materiałów przydatnych na górne warstwy nasypów w strefie przemarzania lub na podbudowę nawierzchni drogowej o ruchu lekkim. Autorzy zaklasyfikowali również mieszaniny popiołowo-żużlowe z dodatkiem 8% spoiwa Terramix F22,5 jako materiał przydatny do górnej warstwy ulepszonego podłoża i podbudowy pomocniczej dróg o ruchu bardzo lekkim, natomiast mieszaniny popiołowo-żużlowe z dodatkiem 8% Solitexu – to mieszaniny nieprzydatne do stosowania do warstw konstrukcyjnych i do ulepszenia podłoża.

Podsumowując, Autorzy stwierdzili, że badana mieszanina popiołowo-żużlowa może być stosowana jako materiał samodzielny do budowy korpusów nasypów w miejscach suchych lub izolowanych od wody, zaś po stabilizacji spoiwami hydraulicznymi, głównie cementem lub wapnem do formowania warstw konstrukcyjnych, w budownictwie drogowym.

Kolejnym materiałem odpadowym, który z powodzeniem może być stosowany w budownictwie drogowym są zużyte opony samochodowe. Zużyte opony stanowią odpad trwały, który nie ulega naturalnemu rozkładowi i wykazuje odporność na działanie wody, różnego rodzaju chemikaliów oraz ekstremalnych temperatur (Duda i Siwowski, 2018) [4]. Do wykorzystania w budownictwie komunikacyjnym i hydrotechnicznym najlepiej nadaje się materiał gumowy z recyklingu opon w formie pakietów. Duda i Siwowski (2018) [4] uczestniczyli w badaniach laboratoryjnych geokompozytów z materiałami zasypowymi (kruszywem gumowym, keramzytem, kruszywem naturalnym), a w swoim artykule zajmują się badaniami polowymi dotyczącymi badania rozkładu sił parcia na przyczółek mostowy z zasypką w postaci pakietów z opon z przewarstwieniami z piasku średniego i warstwą buforową ze strzępów gumowych, ułożoną między korpusem a pakietami. Wyniki pomiarów terenowych Autorzy porównali z wynikami symulacji rozkładu parcia, otrzymanymi z analizy numerycznej przeprowadzonej w programie GEO5 w płaszczyźnie 2D za pomocą MES. W modelu numerycznym Duda i Siwowski (2018) [4] przyjęli dwa modele materiałowe: model sprężysty dla warstwy buforowej ze strzępów gumowych i betonowej płyty fundamentowej oraz pakietów sprasowanych zużytych opon samochodowych, oraz model Coulomba-Mohra dla gruntów w podłożu, podbudowy z kruszywa oraz zasypki z piasku średniego.

Jak zauważyli Duda i Siwowski (2018) [4] wadą pakietów z zużytych opon samochodowych jest ich duża ściśliwość wynikająca z małych wartości modułu odkształcenia postaciowego gumy. W nasypach komunikacyjnych problem ten można jednak rozwiązać stosując warstwy transmisyjne z kruszywa naturalnego o odpowiedniej grubości, układane na warstwie pakietów z opon. Autorzy opisali badawczy odcinek dojazdowy na

jezdnię z jednym pasem ruchu o szerokości 3 m, długości dojazdu 22 m. Program badań Autorzy podzielili na pięć etapów: badania pod obciążeniem statycznym i dynamicznym, cykliczne wymuszenia przemieszczeń górnej części ściany pomiarowej $\pm 15 \text{ mm} / \pm 30 \text{ mm} / \pm 45 \text{ mm}$, ponowne badania pod obciążeniem statycznym i dynamicznym. Duda i Siwowski (2018) [4] zauważyli, że w wyniku analizy porównawczej między wynikami badań i analiz numerycznych występują różnice, które między innymi wynikają z wpływu temperatury na rozkład parcia. Występuje znacząca redukcja parcia w zasypce z materiałów gumowych w porównaniu do zasypki z piasku średniego. Autorzy stwierdzili, że parcie na przyczółek, które jest generowane przez zasypkę z pakietów starych zużytych opon samochodowych i warstwy buforowej ze strzępów gumowych ma charakter parcia silosowego oraz że zasypkę z takich pakietów wypełniającą klin odłamu konstrukcji oporowej można traktować w obliczeniach jako samostateczny blok, który nie generuje parcia.

WYBRANE ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE BUDOWNICTWA KOLEJOWEGO

Transport kolejowy jest obecnie uniwersalnym sposobem transportu zapewniającym bezpieczeństwo, efektywność energetyczną i brak emisji dwutlenku węgla CO_2 . Podtorze jest konstruowane na powierzchni terenu w celu redukcji naprężenia wywołanego przejazdami pociągów. Do budowy wyższych warstw podtorza stosuje się podsypkę. Grubość warstwy podsypki wynosi minimum $0,25 \div 0,30 \text{ m}$. Podsypka składa się z niezwiązane grubookruchowego kruszywa o uziarnieniu z przedziału $22,5 \div 63 \text{ mm}$. Podsypka powinna mieć odpowiednią odporność na miażdżenie i ścieranie powodowane przez powtarzające się obciążenia oraz odporność na mechaniczne niszczenie i wietrzenie. Można zaobserwować, że wraz z upływem czasu użytkowania torów kolejowych zmienia się uziarnienie podsypki. Jest to spowodowane miażdżeniem ziaren, wietrzeniem, infiltracją materiału z powierzchni i dolnych warstw. Z tego powodu mechaniczne zachowanie się podsypki w celu przewidywania bezpieczeństwa i kosztów utrzymania torów kolejowych, w szczególności kolei dużych prędkości, jest ważnym zagadnieniem. Monotoniczne badania trójosowego ściskania przeprowadzane w warunkach z odpływem, które przedstawiono w literaturze były analizowane za pomocą teorii stanu tarcowego (*Frictional State Theory*). Według Dołyk-Szypcio (2018) [5] zależność naprężenie – dylatacja plastyczna pokazuje, że można wydzielić cztery poziomy ścinania. Wpływ stanu naprężenia i zawartości wody może być określony przy użyciu teorii stanu tarcowego. Dołyk-Szypcio (2018) [5] na podstawie wyników badań przeprowadzonych przez Aingarana (2014) i danych zaczerpniętych od Trinha i in. (2012), przeanalizowała zależności naprężenia i dylatacji dla podsypki. Do tych analiz Autorka wykorzystwała teorię stanu tarcowego. Przedstawiła wpływ stanu naprężenia i zawartości wody na zależność „naprężenie – dylatacja”. Autorka dowodzi w swoich analizach, że zachowanie się podsypki w zakresie małych wartości naprężenia różni się znacznie od zachowania się podsypki w zakresie dużego naprężenia, co jest spowodowane zróżnicowaną dylatacją podczas ścinania. W opinii Dołyk-Szypcio (2018) [5] teoria stanu tarcowego może być stosowana w przyszłości do modelowania zachowania się podsypki w ramach sprężysto-plastyczności.

Kolejnym zagadnieniem, któremu należy poświęcić więcej uwagi, są podkłady kolejowe, które przenoszą obciążenia pionowe, poprzeczne i podłużne na podsypkę torów i podłoże. Podkłady umożliwiają zachowanie stałej odległości między szynami. Grubość podsypki powinna wynosić od 0,16 do 0,35 m, w zależności od klasy projektowanego toru, i powinna być zagęszczona tam, gdzie podsypka wspiera podkład. Eksploatacja torów kolejowych powoduje zanieczyszczenie podsypki, kruszenie się materiału pod cyklicznymi dynamicznymi obciążeniami, co prowadzi do osiadania podkładów. W związku z tym miąższość podsypki jest niewystarczająca i pojawiają się niepożądane efekty, takie jak podłużna nierówność szyn i ich skręcanie. Skutki te mają negatywny wpływ na wygodę i bezpieczeństwo podróży, a w skrajnych przypadkach mogą doprowadzić do wykołowania się pociągu. Parametry takie jak: miąższość podsypki, stopień jej zanieczyszczenia, gęstość i osiadania podkładów są trudne do określenia, dlatego można je uznać za „rozmyte”. Z tego właśnie powodu zbiory rozmyte i funkcje transformacyjne mogą być stosowane do określenia tych parametrów. Relacje przyczynowo-skutkowe i ich wpływ na niezawodność systemu przeanalizowali Mieloszyk i in. (2018) [7] za pomocą zbiorów rozmytych. Autorzy szczególną uwagę poświęcają koncepcji przewidywania podbijania torów w celu poprawy współpracy powierzchni toru z podłożem gruntowym i w celu zwiększenia bezpieczeństwa. Autorzy potwierdzają, że stosowanie zbiorów rozmytych może być przydatne, gdy należy podjąć decyzję, na przykład: czy na danej linii kolejowej należy ograniczyć prędkość pociągów, czy zachodzi potrzeba rozpoczęcia prac bieżącego utrzymania torów czy głównych napraw, czy składowe torów powinny być wymienione, naprawione czy zregenerowane po określonym czasie użytkowania.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule zagadnienia nie wyczerpują tematyki związanej z infrastrukturą drogową. Wśród wielu metod wzmacniania słabonośnego podłoża gruntowego należałoby wymienić między innymi (Bzówka i in., 2015) [3]: kolumny kamienne wykonywane techniką konsolidacji dynamicznej, kolumny iniekcyjne czy też kolumny DSM (*Deep Soil Mixing*). Wyroby geosyntetyczne nadal są stosowane w budownictwie drogowym w formie geosiatek, georusztów, jak również materacy geosyntetycznych. Do zabezpieczania stateczności skarp nasypów są stosowane maty przeciwoerozyjne, zaś do zabezpieczania skarp głębokich wykopów kotwy gruntowe i materace gabionowe. Projektanci coraz częściej sięgają po nowoczesne

narzędzia służące do obliczeń nośności, stateczności i osiadań, które wykorzystują metodę elementów skończonych. W ostatnich latach wiele kilometrów dróg ekspresowych i autostrad oddano do użytkowania. Wciąż powstają nowe drogi kołowe, jak i kolejowe, stąd problematyka geotechniczna związana z projektowaniem, wykonawstwem, a następnie z użytkowaniem infrastruktury transportowej jest nadal aktualna.

LITERATURA

1. Bajda M., Skutnik Z., Lech M., Rabarjoeły S.: Ocena parametrów gruntów organicznych do projektowania wzmocnienia podłoża drogi ekspresowej na podstawie badań in situ, *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 2018.
2. Bajda M., Skutnik Z.: Ocena modułu ścinania gytii na podstawie geotechnicznych badań terenowych, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 4, 2010, 507-511.
3. Bzówka J., Knapik K., Juzwa A., Stelmach K.: *Geotechnika komunikacyjna*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
4. Duda A., Siwowski T.: Badanie parcia na przyczółek mostowy zasypki z materiałów z recyklingu opon samochodowych, *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 2018.
5. Dołyż-Szypcio K.: Stress-dilatancy for railway ballast, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2018.
6. Lechowicz Z., Garbulewski K., Bąkowski J., Wdowska M., Wrzesiński G., Fernandes I. R.: Wykorzystanie etapowej budowy z przeciążeniem do wzmocnienia podłoża organicznego nasypu drogi ekspresowej, *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 2018.
7. Mieloszyk E., Milewska A., Grulkowski S.: Forecasting of railway track tamping based on settlement of sleepers Using fuzzy logic, *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 2018.
8. Młynarek Z., Wierzbicki J., Stefaniak K.: Evaluation of deformation parameters of organic subsoil by means of CPTU, DMT, SDMT, *Architecture-Civil Engineering-Environment*, No. 4, 2013, 51-60.
9. Sołtys G., Brzozowski T.: Analiza wsteczna zachowania się nasypu drogowego posadowionego na kolumnach z warstwą transmisyjną na podstawie długookresowego monitoringu, *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 2018.
10. Szypulski P., Kurek N.: Kontrola jakości zagęszczenia wglębnego podłoża z gruntów niespoistych w aspekcie posadowienia niskich nasypów infrastrukturalnych, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 2018.
11. Zawisza E., Gruchot A., Bigos M.: Stabilizacja mieszanin popiołowo-żużlowych spoiwami hydraulicznymi do celów budownictwa drogowego, *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 2018.