

Problemy geotechniczne posadowień obiektów infrastruktury transportu lądowego

Elżbieta Stilger-Szydło, Antoni Szydło

W pracy przedstawiono wybiórcze problemy związane z posadowieniem obiektów infrastruktury transportowej. Zwrócono uwagę na diagnostykę podłoża i wymagania Eurokodów w tym względzie, zwłaszcza w odniesieniu do budowli liniowych. Podano najczęściej stosowane metody wzmocnienia słabego podłoża. Zasygnalizowano problemy jakie występują przy stosowaniu gruntów antropogenicznych bądź wysadzinowych do budowy nasypów. Poddano dyskusji zagadnienia stateczności skarp w świetle Eurokodów.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW data zgłoszenia do redakcji: 28.06.2012 data akceptacji do druku: 20.07.2012



Prof. dr hab. inż.
Elżbieta Stilger-Szydło,
prof. zw. PWR.
Instytut Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej
elzbieta.stilger-szydlo@pwr.wroc.pl



Prof. dr hab. inż.
Antoni Szydło,
prof. zw. PWR.
Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej
Katedra Dróg i Lotnisk
antoni.szydlo@pwr.wroc.pl

Posadowienia obiektów infrastruktury transportu lądowego stanowią rozległy dział dziedziny fundamentowania. Aktualnie jest to problem niezwykle istotny w Polsce w związku z realizowaną budową i rozbudową sieci dróg, autostrad, linii kolejowych, obiektów mostowych oraz lotnisk. Obiekty infrastruktury transportowej posadawiane są często w złożonych i skomplikowanych warunkach geologiczno-inżynierskich, na gruntach słabonośnych, terenach osuwiskowych, czy w zasięgu eksploatacji wpływów górniczych. Istnieje potrzeba prawidłowego rozpoznania podłoża gruntowego, projektowania i wykonania budowli ziemnej z zastosowaniem odpowiednich sposobów wzmocnienia podłoża i zabezpieczenia samej budowli. Skomplikowana natomiast budowa geologiczna dolin rzecznych, głębokie rozmycia dna rzek, duże, skoncentrowane obciążenia pionowe i poziome przekazywane przez podpory mostów na podłożu – stwarzają konieczność stosowania fundamentów głębokich, specjalnych

metod wzmocnienia podłoża oraz wprowadzania nowych technologii posadowień. Malejące w niektórych rejonach kraju zapasy naturalnych gruntów do budowy nasypów stwarzają konieczność korzystania z gruntów antropogenicznych, co sprawia, że istnieje potrzeba indywidualnego potraktowania takich budowli w zakresie projektowania i kontroli jakości, ponieważ nie ma w tym zakresie stosownych zapisów normowych.

Z uwagi na szeroki wachlarz zagadnień geotechnicznych, z którymi mamy do czynienia w inżynierii transportowej, w referacie poruszono jedynie współczesne problemy, które występują od kilku lat na jakże licznych budowanych oraz modernizowanych obiektach drogowych, mostowych i kolejowych. Zwrócono uwagę na diagnostykę podłoża i wymagania Eurokodów w tym względzie, zwłaszcza w odniesieniu do budowli liniowych. Podano najczęściej stosowane metody wzmocnienia słabonośnego podłoża. Zasygnalizowano problemy, jakie występują przy stosowaniu gruntów antropogenicznych bądź wysadzinowych do budowy nasypów. Poddano dyskusji zagadnienia stateczności skarp w świetle krytykowanego współczynnika stateczności skarp oraz wymagań Eurokodów.

Programowanie badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych

Badania podłoża pod projektowane oraz modernizowane obiekty drogowe

Badania podłoża pod budowle drogowe, kolejowe, bądź drogi startowe odbywają się w dwóch etapach. Etap I obejmuje rozpoznanie podłoża gruntowego w celu bezpiecznego posadowienia nasypów i konstrukcji nawierzchni (jest to przypadek, gdy droga lub kolej przebiega w nasypie) bądź tylko konstrukcji nawierzchni w przypadku gdy droga lub kolej przebiega po terenie lub w wykopie. Drugim etapem są badania

mające na celu ochronę nawierzchni drogowej, kolejowej czy lotniskowej przed skutkami wysadzinowości oraz mające na celu zapewnienie odpowiedniej trwałości tym konstrukcjom. Etap ten obejmuje badania gruntów nasypów lub podłoża w wykopie, znajdujących się bezpośrednio bądź w sąsiedztwie konstrukcji nawierzchni.

Stosowanie nowych rozwiązań i technik posadowień obiektów infrastruktury transportu lądowego, bardzo często na terenach o niekorzystnych warunkach geotechnicznych, wytyczają kierunki rozwoju eksperymentalnej geotechniki. Udoskonala się metody obliczeniowe, metody badań ośrodka gruntowego oraz ich interpretacje zmierzające do właściwego doboru parametrów do projektowania geotechnicznego. W ciągu ostatniego dwudziestolecia w kraju i za granicą nastąpił znaczny postęp w kierunku poznania zachowania się gruntów w złożonych sytuacjach projektowych. Jest on przede wszystkim wynikiem poszukiwania i wprowadzenia nowoczesnych badań in situ, umożliwiających interpretacje otrzymywanych wyników w bardzo szerokim zakresie. Z dotychczas stosowanych metod badań in situ podłoża gruntowego, największe zastosowanie praktyczne znalazły: sondowania statyczne, dynamiczne, dylatometryczne i presjometryczne.

W przypadku inwestycji drogowej bądź kolejowej (liniowej na znacznej długości), zalecane na etapie badań rozpoznawczych analizy materiałów archiwalnych, wizje lokalne terenu, czy też interpretacje zdjęć lotniczych lub satelitarnych, można rozszerzyć na obszary słabiej rozpoznanych o badania: kontrolne ręcznymi sondami penetracyjnymi do głębokości 3,0–5,0 m; sondami rdzeniowymi do głębokości 10,0 m; obserwacyjne i pomiarowe dotyczące wód gruntowych i powierzchniowych; badania geofizyczne.

Etap badań podstawowych pozwala na: wybór rozwiązań technicznych budowli i ocenę kosztu inwestycji, określenie para-

metrów geotechnicznych gruntu podłoża konstrukcji budowli drogowej. Podstawowymi badaniami polowymi są: wyrobiska badawcze oraz badania in situ. Wyrobiska badawcze obejmują: wiercenia i sondy penetracyjne, doły próbne, wykopy badawcze. Potrzebna liczba i rozstaw wyrobisk zależy od stopnia złożoności budowy podłoża oraz od klasy drogi.

Wiercenia badawcze – w gruntach rodzimych mineralnych według [12] głębokość wierceń i sond penetracyjnych lub rdzeniowych nie powinna być mniejsza od 3,0 m poniżej powierzchni terenu lub projektowanej niwelety drogi. W gruntach rodzimych organicznych głębokości wierceń powinny sięgać co najmniej 2,0 m poniżej spągu tych gruntów. Na odcinkach nasypów i występowania gruntów antropogenicznych wystarcza zazwyczaj głębokość wierceń równa 2,0 m w warstwy mniej ściśliwe (o module $M_0 \geq 20$ MPa). W przypadku występowania w podłożu gruntów bardzo ściśliwych zaleca się wykonywać wiercenia badawcze do nośnego podłoża. Przy kategorii geotechnicznej 3 obiektów oraz na obszarach występowania procesów geodynamicznych, lokalizacja, liczba i głębokość wyrobisk badawczych powinna być określana w projekcie indywidualnie i korygowana podczas badań.

Sondowania – uzupełnieniem rozpoznania podłoża za pomocą wierceń są badania in situ: sondowania dynamiczne i statyczne (sonda wkręcana ST do płytkiego rozpoznania, sonda CPT do rozpoznania głębokiego i dokładnego ustalenia układu warstw), ścinanie sondą obrotową, próbne obciążenia gruntu i inne.

Wyniki badań powinny stanowić kompletną ocenę warunków geologiczno-inżynierskich i hydrogeologicznych wzdłuż całej trasy projektowanej drogi, uwzględniając przede wszystkim rozpoznanie podłoża na odcinkach wykopów (ocena trudności w odspajaniu gruntu, stateczności skarp, wykorzystania gruntów do robót ziemnych), nasypów (zwłaszcza posadowionych na gruntach ściśliwych i słabonośnych) oraz występowania osuwisk i w strefie bezpośredniego oddziaływania obciążeń nawierzchni drogowej.

Badania odkształcalności gruntów – wyniki badań cech odkształceniowych gruntu (presjometryczne i dylatometryczne) wykorzystuje się zwłaszcza przy posadowieniach obiektów mostowych, przy obliczaniu granicznej nośności i osiadań fundamentów bezpośrednich oraz nośności i przemieszczeń bocznych fundamentów palowych. Badanie presjometryczne jest próbnym obciążeniem gruntu na żądanej głębokości, w otworze, za pomocą sondy o kształcie cylindra, rozszerzanej radialnie. Standardowe badanie presjometryczne polega na

rejestracji zmian średnicy otworu i analizie zależności między stanem naprężenia i odkształcenia w gruncie.

Test dylatometryczny DMT (the Marchetti Dilatometer Test) znajduje zastosowanie przy obiektach kategorii geotechnicznej 2 i 3, zwłaszcza do posadowień mostów, ścian oporowych i obudowy głębokich wykopów. Dylatometr można stosować do: określenia rodzaju i stanu gruntu, ustalenia profilu podłoża i historii naprężenia w gruncie, oszacowania wartości parametrów geotechnicznych (wytrzymałości na ścinanie bez odpływu, współczynnika spoczynkowego parcia bocznego K_0 w gruntach niespoistych i spoistych, naprężenia prekonsolidacji, modułów odkształcenia).

Wykorzystanie Eurokodów geotechnicznych w drogownictwie przy programowaniu badań gruntów i podłoża

Zgodnie z Rozporządzeniami [7], [8] oraz instrukcją [12] zakres badań podłoża drogowych budowli ziemnych obejmuje:

- rozpoznanie podłoża gruntowego, w tym rodzajów gruntów (składu granulometrycznego, wilgotności naturalnej, granicy plastyczności i płynności, zawartości części organicznych) oraz położenia zwierciadła wody (w Rozporządzeniach [7], [8] brakuje informacji na temat rozstawu otworów oraz głębokości wierceń badawczych);
- badania wysadzinowości gruntu: kapilarności biernej, wskaźnika piaskowego oraz pęcznienia liniowego;
- oznaczenie wskaźnika nośności CBR, który określa grupy nośności podłoża;
- ocenę zagęszczenia poprzez identyfikację: wskaźnika zagęszczenia (według metody Proctora) oraz określenie pierwotnego i wtórnego modułu podłoża za pomocą próbnych obciążeń płytami;
- określenie współczynnika filtracji materiału warstw odsączających i mrozoochronnych.

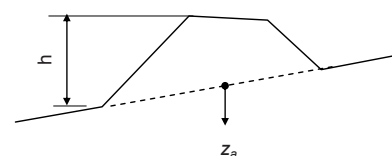
Rozpoznanie podłoża gruntowego w ujęciu Eurokodu 7 (PN-EN 1997-2, [6]) w zakresie dotyczącym posadowienia konstrukcji nawierzchni drogowych obejmuje następujące badania:

Rozstawy punktów badawczych w budowlach liniowych: 20 m do 200 m.

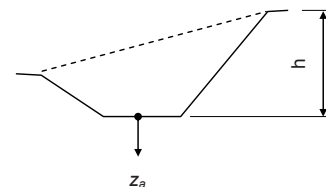
Głębokość rozpoznania podłoża (z_a), odmierzana od najniższego punktu budowli, wykopu i nasypu (rys. 1, 2):

- a) przy nasypach o wysokości h , $0,8 h < z_a < 1,2 h$ lub $z_a \geq 6$ m; przyjmuje się większą wartość;
- b) przy wykopach o głębokości h , $z_a \geq 2$ m; lub $z_a \geq 0,4 h$, przyjmuje się większą wartość.

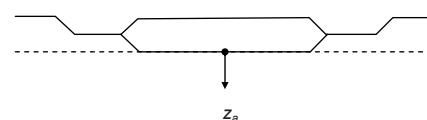
W przypadku budowli liniowych należy przyjąć większą z wartości spełniających warunki (rys. 3):



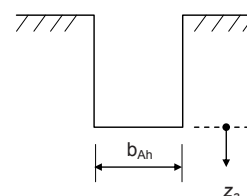
1. Głębokość rozpoznania podłoża nasypów



2. Głębokość rozpoznania podłoża wykopów



3. Głębokość rozpoznania podłoża w przypadku dróg i lotnisk w nasypach i wykopach



4. Głębokość rozpoznania podłoża gruntowego w przypadku wykopów wąsko przestrzennych

- a) drogi i lotniska: $z_a \geq 2$ m poniżej niwelety,
- b) wykopu wąsko przestrzennego (rys. 4) o szerokości b_{Ah} : $z_a \geq 2$ m; lub $z_a \geq 1,5 b_{Ah}$
- c) w razie potrzeby zaleca się zastosować wytyczne, jak w przypadku nasypów i wykopów.

Do podstawowych badań gruntów (według Eurokodu 7 [6]) przy projektowaniu posadowień konstrukcji nawierzchni drogowych należy zaliczyć:

Badania w celu klasyfikacji gruntów – które są podstawowymi badaniami (typu: skład granulometryczny, wilgotność, gęstość objętościowa, gęstość właściwa, granice konsystencji, skład chemiczny gruntów i wody). Badanie kalifornijskiego wskaźnika nośności (CBR) – wartość wskaźnika CBR, zagęszczonej albo nienaruszonej próby, otrzymuje się jako procent standardowego obciążenia odpowiadającego standardowemu zagłębieniu, przy zagłębieniu tłoka o określonym przekroju poprzecznym w materiał gruntowy.

Badanie mrozoodporności – wysadzinowość gruntów odgrywa zasadniczą rolę przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni drogowych. Konstrukcje te są narażone na działanie zjawisk mrozowych, powstających w wyniku zamarzania gruntów wysadzi-

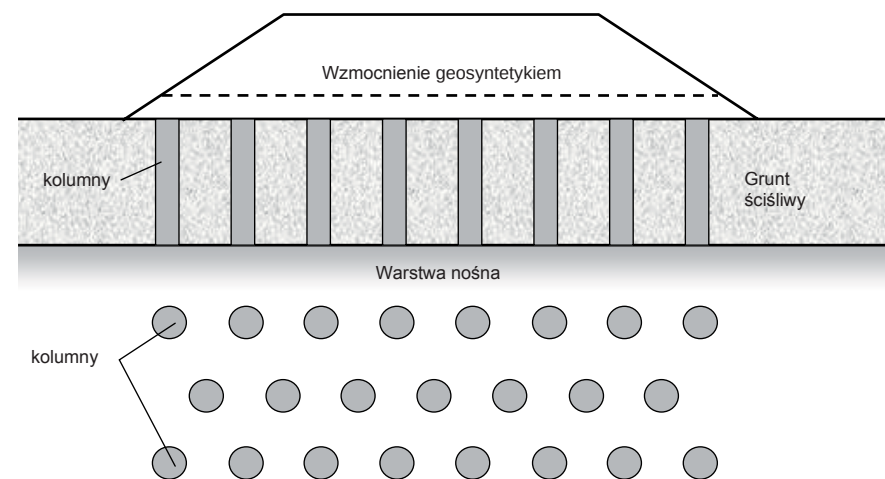
Tab. 1: Minimalna liczba podstawowych wierceń badawczych [12]

Obiekt	Minimalna liczba wierceń	
	Warunki proste	Warunki złożone
Mosty jednoprzęsłowe: $B \leq 15,0$ m $B > 15,0$ m	1 na podporę 2 na podporę	2 na podporę 2 na podporę (rozstaw $< 20,0$ m)
Mosty wieloprzęsłowe: $B \leq 15,0$ m, $L \leq 20,0$ m $B \leq 15,0$ m, $L > 20,0$ m $B > 15,0$ m, $L \leq 20,0$ m $B > 15,0$ m, $L > 20,0$ m	1 na co drugą podporę	2 na podporę
	1 na podporę	2 na podporę
	1 na podporę	2 na podporę (rozstaw $< 20,0$ m)
	2 na podporę	2 na podporę (rozstaw $< 20,0$ m)
Przepusty: $L \leq 20,0$ m $L > 20,0$ m	2 3	2 3

nowych mających kontakt z wodami gruntowymi. Procesowi temu mogą podlegać grunty w stanie naturalnym lub stanowiące materiał antropogeniczny podłoża konstrukcji. Ryzyko wysadzinowości może być oszacowane na podstawie korelacji pomiędzy właściwościami gruntów oznaczonymi do celów klasyfikacji (skład granulometryczny, wysokość podciągania kapilarnego, zawartość cząstek drobnych) lub na podstawie badań laboratoryjnych. Wysadzinowość gruntu w stanie naturalnym należy badać na naturalnych próbkach gruntu, zaś gruntowych nasypów – na próbkach ponownie zagęszczonych i ponownie skonsolidowanych lub na próbkach odtworzonych. Badanie mrozoodporności w warunkach laboratoryjnych jest badaniem wysadzinowości. Ryzyko osłabienia, spowodowane rozmrażaniem, ocenia się poprzez badanie kalifornijskiego wskaźnika nośności (CBR) po rozmrożeniu próbki. Próbkę zagęszczoną ponownie lub odtworzoną powinna być poddana przed badaniem – jednemu lub większej liczbie cykli zamrażania-rozmrażania. Grunt jest uważany za wrażliwy na mróz, jeśli w laboratoryjnym badaniu wysadzinowości mrozowej pojawiają się wysadziny. Interpretacja badań mrozoodporności powinna brać pod uwagę doświadczenia dotyczące skutków działania mrozu.

Badanie zagęszczalności gruntu – najczęściej stosowanymi badaniami są standardowe lub zmodyfikowane badania zagęszczania wg Proctora. Badanie zagęszczenia gruntu umożliwia określenie zależności między gęstością objętościową szkieletu gruntowego a wilgotnością. Wilgotność optymalna (W_{opt}) i odpowiadająca jej maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ($\rho_{d,max}$), uzyskana przy stosowaniu określonej energii zagęszczania, jest wykorzystywana do oceny jakości zagęszczanego materiału drogowych budowli ziemnych.

Badanie przepuszczalności gruntu – ta cecha gruntu może być określana na podsta-



5. System posadowienia GEC nasypów na autostradzie A2

wie: bezpośrednich badań przepuszczalności na próbkach gruntu w laboratorium, polowych badań przepuszczalności. Najbardziej wiarygodną metodą wyznaczania wartości współczynnika filtracji jest metoda badań polowych.

Badanie gruntów za pomocą próbných obciążeń płytami – badania te mają na celu określenie modułów podłoża gruntowego (E) oraz współczynników podatności (analogia do współczynnika reakcji podłoża Winklera), jako stosunku naprężenia pod płytą do osiadania płyty.

Badanie pozostałych parametrów gruntów – Eurokod 7 podaje również inne badania, które należy wykonać, w zależności od potrzeb. Należą do nich: badanie sondą stożkową, badanie presjometryczne, badanie sondą cylindryczną, badanie sondą dynamiczną, krzyżakową i wkręcaną, badanie edometryczne, badanie jednoosiowego ściskania, trójosiowego ściskania bez konsolidacji i z konsolidacją, badanie bezpośredniego ścinania w aparacie skrzynkowym i obrotowym.

Porównując rodzaje badań gruntów dotychczas stosowane w kraju przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni drogowych oraz proponowane przez Eurokod 7 [6] należy stwierdzić, że badania te pokrywają się, z wyjątkiem badań mrozoodporności i wodoprzepuszczalności. W Eurokodzie 7 zaleca się sprawdzanie warunku mrozoodporności gruntów w badaniach CBR po cyklach zamrażania i rozmrażania i porównanie wartości CBR ze stanem przed zamrażaniem. Jest jeszcze różnica w zakresie określania przepuszczalności gruntów. Aktualnie w kraju korzysta się z ustaleń specyfikacji PKN-CEN ISO/TS 17892-11, według której wskaźnik wodoprzepuszczalności określa się w warunkach laboratoryjnych (bez określenia stanów zagęszczenia). W Eurokodzie 7 zaleca się natomiast oznaczanie współczynnika wodoprzepuszczalności w warunkach in situ.

W kraju po roku 2010, zgodnie z decyzją

Komisji Europejskiej, powinny być stosowane jedynie Eurokody oraz normy z nimi zharmonizowane. W związku z tym, pilnie powinny być podjęte prace zmierzające do szybkiego opracowania załączników krajowych, zarówno do PN-EN 1997-1 (zasad ogólnych), jak też do PN-EN 1997-2 (w zakresie rozpoznania i badania podłoża gruntowego). Brak tych załączników uniemożliwia wdrożenie Eurokodów do projektowania posadowień obiektów infrastruktury transportu lądowego.

Wymagania odnośnie do badań podłoża pod obiekty mostowe

Nieco odmiennie programuje się wiercenia badawcze przy projektowaniu obiektów mostowych. Liczba i usytuowanie podstawowych wierceń badawczych w warunkach geologicznych prostych i złożonych zależy od szerokości mostu i średniej rozpiętości przęseł (tabela 1). Przy skomplikowanej budowie geologicznej, siatkę wierceń podstawowych zagęszcza się lub przewiduje wiercenia pomocnicze. Dotyczy to przede wszystkim: stref zaburzeń gładitektonicznych, terenów osuwiskowych, zjawisk krasowych i stref krańcowych dolin rzecznych, występowania cienkich, przewarstwień lub soczewek gruntów ściśliwych.

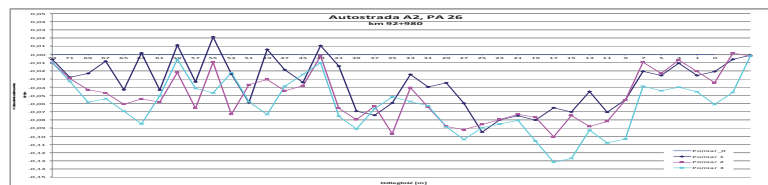
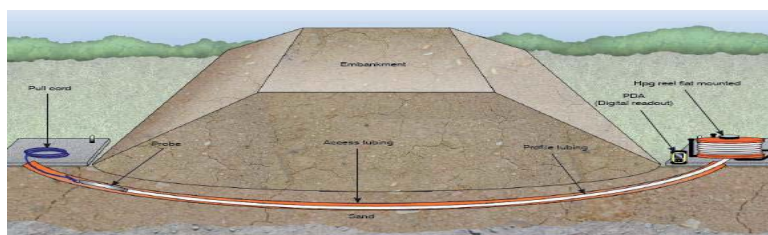
Potrzebna głębokość wierceń badawczych zależy od rodzaju budowli i wartości obciążeń przekazywanych na podłoże oraz od warunków gruntowych. Fundamenty bezpośrednie mostów – głębokość otworów podstawowych nie powinna być mniejsza od 5,0 m poniżej przewidywanego spodu fundamentu (orientacyjnie 6,0÷8,0 m poniżej poziomu terenu). Możliwe jest płytsze zakończenie otworów, lecz co najmniej 2,0 m poniżej stropu warstwy nośnej. Wiercenia pomocnicze doprowadza się do głębokości równej 1,0÷2,0 m poniżej spągu gruntu o małej nośności. Fundamenty głębokie mostów – potrzeb-

na głębokość wierceń można przyjmować równą zagłębieniu pali, powiększonemu o co najmniej 3,0 m (orientacyjnie 10,0÷25,0 m poniżej poziomu terenu), a studni lub keso-nów – o 5,0 m (15,0÷30,0 m od powierzchni terenu). Otwory powinny jednak być zagłę-bione co najmniej 6,0 m w warstwę gruntu nośnego. Głębokości te można zmniejszyć, jeśli wiercenia przeprowadza się w war-stwach jednorodnych o dużej miąższości (iły plicieńskie, iły krakowieckie itp.). Konstrukcje oporowe – głębokość wierceń powinna przekraczać możliwą powierzchnię poślizgu oraz osiągać głębokość poni-żej spodu fundamentu równą, co najmniej wysokości ściany lub uskoju terenu. Przepusty o świetle ponad 1,0 m – głębo-kość wierceń powinna sięgać co najmniej 4,0 m poniżej spodu fundamentu (pod wy-sokimi przepustami sklepionymi może ona dochodzić do 8,0÷10,0 m).

Przy posadowieniach podpór mosto-wych na palach szczegółowość badań geotechnicznych powinna wynikać z ce-lów, jakim mają służyć. Zakres rozpoznania regulowało rozporządzenie MSWiA (1998), wprowadzające pojęcie kategorii geotech-nicznej. W obiektach mostowych jest to najczęściej kategoria druga. Zakres badań podłoża determinuje w pewnym sensie norma [10], poprzez stawiane wymagania odnośnie do: pogrążenia podstawy pala w grunty nośne, pogrążenia podstawy pala w warstwie, w której wyznaczono nośność podstawy oraz minimalnych odległości od stropu i spągu warstwy, w której pal jest zakończony. Ustalenie pełnego zakresu rozpoznania nie jest możliwe bez wyboru technologii palowej i obliczenia długości pali. Dlatego też prace związane z rozpo-znaniem podłoża prowadzi się etapowo. Badania wstępne mają na celu określenie sposobu posadowienia. Gdy konieczne jest posadowienie pośrednie, należy określić długości pali (choćby ekstrapolując wyniki badań w głąb). Kluczowe są badania szcze-gółowe do zaprojektowania posadowienia konstrukcji mostu i jego realizacji.

Metody wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym i mostowym

Jednym z podstawowych problemów geo-inżynierii jest umiejętność dokonywania wzmocnienia słabonośnego podłoża na-wierzchni drogowych, budowli ziemnych i fundamentów podpór mostowych. Jest ono konieczne wówczas, kiedy nie są speł-nione odpowiednie warunki techniczne dotyczące nośności podłoża i stateczności skarp lub przydatności do użytkowania. Celem wzmocnienia podłoża gruntowego jest zazwyczaj: zwiększenie jego nośności, zmniejszenie osiadania budowli, zapobie-



6. System pomiaru osiadań nasypu Autostrady płatnej A2 Świecko-Nowy Tomyśl [14]

ganie utracie stateczności (poślizgom, osu-wiskom), zabezpieczenie skarp wykopów, nasypów i ochrona sąsiednich konstrukcji, zapobieganie upłynnianiu podłoża, stabili-zacja jego struktury, czy wreszcie łagodze-nie skutków deformacji górniczych podłoża [3]. Wybór tej najodpowiedniejszej metody wzmacniania, spośród szerokiego wachla-rza istniejących nowoczesnych technologii, powinien być uzależniony od szczegóło-wego rozpoznania podłoża gruntowego i jednocześnie dostosowany do warunków pracy wzmacnianego obiektu. Najczęściej stosowane metody wzmocnień podłoża, to: osuszanie, elektroosmoza, zagęszcza-nie powierzchniowe, ulepszanie uziarnie-nia i stabilizacja mechaniczna, ulepszanie gruntu spoiwami, stabilizacja chemiczna spoiwami, pełna lub częściowa wymiana gruntu, wyparcie gruntu nasypem, lekkie wypełnienia nasypu, wstępne obciążenie, budowa etapowa, przeciążenie, konsoli-dacja wspomagana drenami pionowymi, konsolidacja wspomagana podciśnieniem, przypory boczne podstawy nasypu, wibro-flotacja, wibrowymiana, kolumny piaskowe/żwirowe w osłonie geotekstylnej, kolumny wibrobetonowe, konsolidacja dynamiczna (ubijanie), słupy wybijane udarami, mikro-wybuchy, pale zagęszczające, mieszanie wgłębne, gwoździowanie gruntu, kotwie-nie, zbrojenie geosyntetykami. Wybór metod wzmacniania podłoża w budow-nictwie drogowym, kolejowym zależy od wielu czynników formalnych, technicznych, ekonomicznych oraz od wymaganego cza-su wykonania. Poniżej podano przykłady nowoczesnych wzmocnień podłoża grun-towego przy posadowieniach obiektów infrastruktury transportu lądowego w kraju.

System posadowienia GEC (Geotextile Encased Columns) – jest systemem no-snym opartym na kolumnach w osłonie geotekstylnej. Kolumny wykonane ze żwiru lub piasku opasane są georurą (rys. 5). Pod-stawy kolumn posadowione są w gruncie nośnym, w celu zmniejszenia obciążenia wywieranego przez nasyp i obciążenia

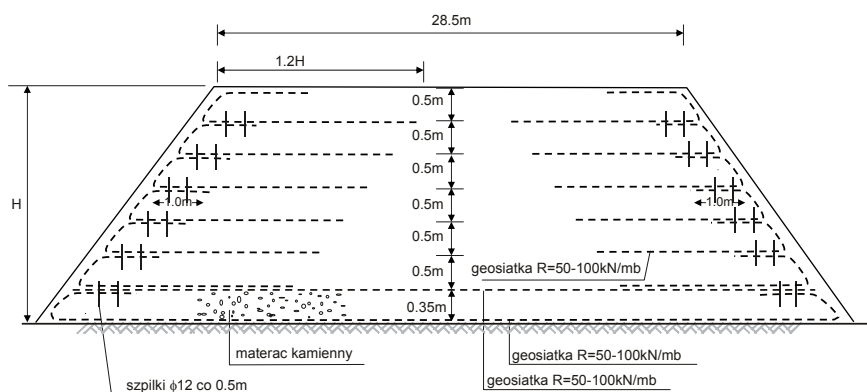
użytkowego na grunty ściśliwe przykrywa-jące warstwę nośną. Nośność posadowienia GEC wynika z koncentracji naprężeń nad głowicami kolumn i odpowiednio zmniejszonego pionowego nacisku na grunt ściśli-wy znajdujący się pomiędzy kolumnami, co powoduje znaczną redukcję osiadania cał-kowitego, również przebieg osiadania jest przyspieszony z uwagi na drenujący wpływ kolumn.

Model obliczeniowy powstał na Uniwer-sytecie Kassel (1994 rok) [14] na podstawie istniejącej metody wymiarowania kolumn piaskowych i żwirowych z uwzględnieniem osłony geotekstylnej. Wsparcie promienio-we słupa zostaje zapewnione przez współ-działanie płaszcza z geowłókniny i otaczają-cego gruntu.

W kraju zastosowano tą technologię przy budowie nasypu autostrady A2 na odcinku Nowy Tomyśl – Świecko w km 59+955 ÷ 60+600) o wysokości 3,0÷4,0 m, posado-wionego na torfach i gytiach (o miąższości 9,0÷12,0 m w km 60+050 ÷ 60+100 oraz 22,0÷25,0 m w km 60+200 ÷ 60+530), 2009 rok [14] – przyjęto materiał wypełniający sypki (piasek); zbrojenie poziome z geot-kaniny poliestrowej Stablenka oraz opaski w kształcie rury z geotkaniny poliestrowej typu Ringtrac; kolumny D = 80 cm (roz-mieszczane w regularnej siatce w kształcie trójkąta równobocznego); piasek w kolum-nie: $\phi' = 32,5^\circ$, $\gamma' = 10 \text{ kNm}^{-3}$; osiadanie przy pełzaniu z chwilą zakończenia budowy: bez GEC 2,9÷3,5 cm, z GEC 0,7÷0,9 cm (po pięciu latach: bez GEC 12,0÷18,5 cm, z GEC 3,0÷4,6 cm). Równocześnie zastosowano system moni-torujący osiadania nasypu, który pokazano na rys. 6.

Kolumny wgłębego mieszania DSM

Obwodnica Serocka w ciągu drogi krajowej nr 61 (w km 35+888 ÷ 42+900) – w miejscu lokalizacji czterech obiektów mostowych, bezpośrednio pod fundamentami do głębo-kości 6,5 m występują gliny zwalowe (gliny pylaste, piaszczyste, piaski gliniaste o stopniu



7. Wzmocnienie podłoża i nasypu na terenach górniczych

plastyczności $I_L = 0,18 \div 0,32$). Zaprojektowano bezpośrednie posadowienie tych obiektów na gruncie rodzimym oraz na kompozycie gruntowym wzmocnionym kolumnami wgłębnego mieszania DSM: o średnicy 80 cm i długości od 4 do 17 m (3 200 mb kolumn); wykonano próbne obciążenie kolumny testowej o długości 16,5 m, uzyskano przemieszczenie kolumny na poziomie równe 27 mm przy maksymalnym obciążeniu 1 360 kN.

Metoda gwoździowania

Wzmocnienie nasypu autostrady A4 (Ruda Śląska) – w wyniku osiadań spowodowanych uszkodzeniami górnictwami nastąpiło zdeformowanie i przemieszczenie około 2 km fragmentu nasypu budowanej autostrady. W celu poprawy struktury wewnętrznej nasypu oraz ograniczenia dalszych deformacji i osiadań nawierzchni drogowej nasyp wzmocniono metodą gwoździowania (588 sztuk gwoździ gruntowych Ischebeck TITAN 30/11 o długościach 9 i 10 m; 2004 rok). Również systemem gwoździowania zastabilizowano skarpy wykopu na autostradzie A4 na odcinku Krzyżowa – Zgorzelec.

Wzmocnienie nasypów na uszkodzeniach górniczych

Nasypy autostrady A4 Gliwice – Katowice oraz autostrady A1 Pyrzowice – Maciejów – zastosowanie poduszki z kruszywa zbrojonego geosyntetykami pod podstawą nasypu z równoczesnym zbrojeniem skarpy za pomocą geosyntetyków, zwiększa znacząco nośność nasypu i powoduje równomierne jego osiadanie. Na obu autostradach zastosowano systemy monitoringu. Przykłady zastosowań pokazano na rys. 7.

Budowa nasypów

Na wielu odcinkach autostrad i dróg ekspresowych zastosowano do budowy nasypów grunty antropogeniczne. Przykładowo przy budowie nasypu autostrady A4 na odcinku Sośnica – Mysłowice zastosowano nasypy

z łupków przywęglowych. Na drodze ekspresowej S8 na obwodnicy Oleśnicy zastosowano popioły z elektrociepłowni Wrocław. Na odcinku autostrady A4 Jarosław – Radymno w nasypu w budowano grunty gliniaste oraz ilaste, które uszlachetniano za pomocą spoiw chemicznych (wapno, cement). Problemem, jaki się pojawił przy kontroli wbudowania, było oszacowanie zagęszczenia.

Badania zagęszczenia nasypów i podłoża nawierzchni ustala się na podstawie

wskaźnika zagęszczenia ($I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}}$), badania płytą o średnicy $D \geq 300$ mm. Obciążenia powierzchniowej warstwy podłoża lub nasypu płytą wykonuje się za pomocą aparatury VSS – stalowej płyty o średnicy 0,30 m [12]. Badania obejmują określenie pierwotnego modułu odkształcenia E_1 i wtórnego modułu odkształcenia E_2 (zwanego również modułem odkształcenia sprężystego) oraz wskaźnika odkształcenia I_o (stosunku E_2/E_1). Moduły odkształcenia określa się z zależności

$$E_1 = \frac{3\Delta p_1 D}{4\Delta s_1} \quad E_2 = \frac{3\Delta p_2 D}{4\Delta s_2} \quad (1)$$

gdzie E_1 – pierwotny moduł odkształcenia [MPa], E_2 – wtórny moduł odkształcenia [MPa], $\Delta p_{1,2}$ – różnica obciążeń w pierwszym i drugim cyklu obciążenia w zakresie 0,05 ÷ 0,15 MPa w przypadku podłoża gruntowego oraz w zakresie 0,15 ÷ 0,25 MPa przy podłożu ulepszonym, $\Delta s_{1,2}$ – przyrost przemieszczeń odpowiednio w 1 i 2 cyklu obciążenia, odpowiadający podanemu zakresowi obciążeń, D – średnica płyty pomiarowej. Stosunek modułów wtórnego do pierwotnego określa wskaźnik odkształcenia, który mówi nam o zagęszczeniu nasypu lub podłoża. Norma PN-S-02205 [11] określa wartości wymaganego wskaźnika zagęszczenia typowych gruntów. Brak jest natomiast wymagań odnośnie do gruntów antropogenicznych. W przypadku tych ostatnich, wymagany wskaźnik zagęszczenia zaleca się określać na poletkach próbnych.

Badania płytą obciążaną dynamicznie sta-

nowią alternatywę bądź uzupełnienie badania statycznego przyrządem VSS. W Polsce stosowana jest Lekka Sonda Dynamiczna ZFG 02 (Light Drop-Weight Tester ZFG 02). Zasada działania tego urządzenia polega na wywołaniu uderzeniowego obciążenia gruntu poprzez opuszczenie ruchomego obciążnika wzdłuż prowadnicy. Przyspieszenie płyty mierzone jest przez wbudowany w nią czujnik przemieszczeń [13]. Moduł określa się z zależności (2)

$$E_d = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\sigma}{s} \quad (2)$$

gdzie E_d – dynamiczny moduł odkształcenia [MPa], σ – średnia wartość obciążenia pod płytą [0,1 MN/m²], s – amplituda osiadania [mm], r – promień siły obciążającej [150 mm].

Podczas badania dokonywany jest pomiar maksymalnych przemieszczeń w środku płyty, wywołanych spadającym ciężarem na płytę pomiarową. Przemieszczenia rejestrowane są automatycznie przez urządzenie rejestrujące i przeliczane na moduły. Problemem jest brak korelacji wyników modułów uzyskiwanych z lekkiego ugięciomierza i badań płytami VSS.

Stateczność skarp nasypów drogowych w ujęciu Eurokodu 7

Zgodnie z Rozporządzeniami [7, 8] wymagany minimalny wskaźnik stateczności wynosi 1,5. Wartość ta była powszechnie krytykowana. Jednakże stateczność oceniana według Eurokodu 7 zmienia filozofię podejścia. Poniżej przedstawiono propozycję analizy stateczności skarpy z wykorzystaniem zasad Eurokodu 7 [5].

W celu przeprowadzenia analizy stateczności skarpy nasypów należy sprawdzić stany graniczne GEO oraz STR, których osiągnięcie wiąże się z utratą stateczności ogólnej masy gruntu oraz obiektów towarzyszących (elementów konstrukcyjnych jezdni oraz infrastruktury drogowej), z nadmiernymi przemieszczeniami bądź z przekroczeniem stanu granicznego użytkowania. Do analizy stateczności można zastosować jedno z czterech wprowadzonych przez Eurokod 7 podejść obliczeniowych, które różnią się sposobem przyjmowania wartości poszczególnych współczynników częściowych. Współczynniki częściowe zostały ujęte w trzy grupy (tabela 2): A – współczynniki stosowane do oddziaływań lub ich efektów, obejmujące:

- γ_G – współczynnik częściowy przy oddziaływaniach stałych niekorzystnych (powodowanych głównie ciężarem własnym gruntu – nie jest on tożsamy ze współczynnikiem cząstkowym dla ciężaru własnego gruntu γ_γ);
- γ_{Gfav} – współczynnik częściowy przy oddziaływaniach stałych korzystnych;
- γ_Q – współczynnik częściowy przy oddziaływaniach zmiennych (obciążeniach);

M – współczynniki dla parametrów gruntu, obejmują:
 γ_φ – współczynnik częściowy dla tangensa kąta tarcia wewnętrznego;
 γ_c – współczynnik częściowy dla spójności;
 γ_γ – współczynnik częściowy dla ciężaru objętościowego gruntu;
 R – współczynnik $\gamma_{R,e}$ stosowany dla oporów występujących na powierzchni poślizgu.
 Metody „pasków” w ujęciu Eurokodu 7 – projektowanie zgodnie wymaga wykazania, że obliczeniowe skutki oddziaływań E_d są nie większe, niż odpowiadający im obliczeniowy opór R_d :

$$R_d \geq E_d \quad \text{lub} \quad \frac{R_d}{E_d} \geq 1 \quad (3)$$

Analiza stateczności prowadząca do wyznaczenia minimalnej wartości wskaźnika stateczności F_{min} powinna uwzględniać wartości obliczeniowe parametrów geotechnicznych, oddziaływań i oporów, uzyskiwanych poprzez zastosowanie współczynników częściowych. W powszechnie stosowanych, inżynierskich metodach analizy stateczności (tzw. metodach „pasków”) moment obracający należy traktować jako skutek oddziaływań M_{Ed} , a odpowiadający mu moment utrzymujący – jako opór wobec tych oddziaływań M_{Rd} . Wskaźnik stateczności w ujęciu Eurokodu 7 [8] definiuje zależność:

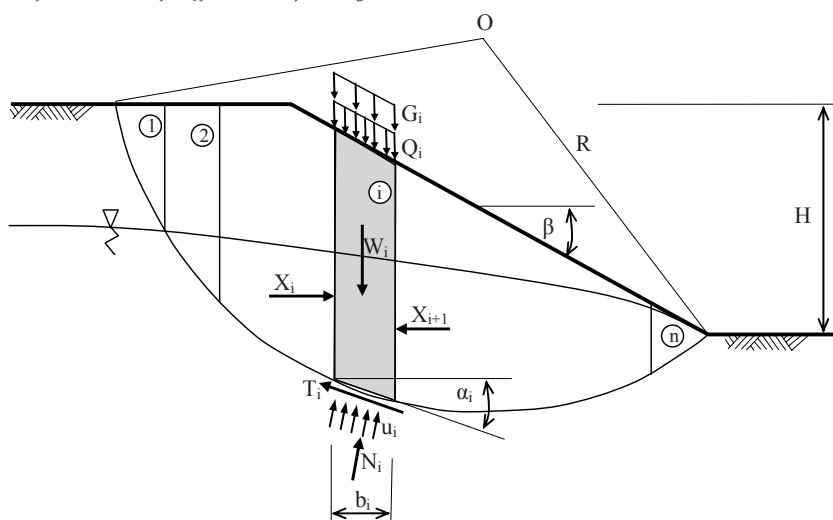
$$F = \frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{ed,i}}{\sum_{i=1}^n (W_{d,i} + Q_{d,i}) \sin \alpha_i} \geq 1$$

gdzie:
 R_{ed} – obliczeniowy opór gruntu na ścinanie wzdłuż podstawy i-tego bloku (paska),
 α_i – kąt nachylenia podstawy i-tego bloku do poziomu,
 $W_{d,i}$ – obliczeniowy ciężar i-tego bloku,
 $Q_{d,i}$ – obciążenie zewnętrzne przyłożone do i-tego bloku.
 Przy takim podejściu minimalny wskaźnik stateczności powinien być nie mniejszy od jedności. Warunek (3) implikuje diametralnie odmienne (od tradycyjnie stosowanego) podejście do oceny stateczności, w którym obliczenia wykonywano z uwzględnieniem charakterystycznych wartości oddziaływań i reakcji gruntu, a wymagany zapas stateczności osiągnąć poprzez przyjmowanie odpowiednio wysokiej wartości dopuszczalnej F_{dop} . Wartość ta, według polskich przepisów [7], [8] w przypadku skarp nasypów drogowych o wysokości powyżej 5 m wynosi: $F_{dop} = 1,50$.
 Zapisy Eurokodu 7 pośrednio wprowadzają warunek, że nie jest dopuszczalne w obliczeniach stateczności przyjmowanie braku sił poziomych między blokami. Wyklucza to

Tab.2: Wartości współczynników częściowych zalecanych do stosowania w analizie stateczności skarp

Współczynniki częściowe		Podejścia obliczeniowe			
		1		2	3
		kombinacja 1 (DA1-1)	kombinacja 2 (DA1-2)	(DA2)	(DA3)
A	γ_G	1,35	1,0	1,35	1,0*
	γ_{Gfav}	1,0	1,0	1,0	1,0
	γ_Q	1,5	1,3	1,5	1,3*
M	γ_φ	1,0	1,25	1,0	1,25
	γ_c	1,0	1,25	1,0	1,25
	γ_γ	1,0	1,0	1,0	1,0
R	$\gamma_{R,e}$	1,0	1,0	1,1	1,0

* oddziaływania te traktuje się jako oddziaływania geotechniczne



8. Schemat metody Bishopa (uproszczonej)

stosowanie do analizy stateczności skarp popularnej metody Felleniusa, jak również wersji metody Janbu, w której rozpatruje się tylko pionowe reakcje między blokami. Warunek równowagi momentów sił oraz rzutów sił poziomych (rys. 8) spełnia metoda Bishopa.

W metodzie tej, wskaźnik stateczności po wprowadzeniu stosownych współczynników częściowych opisuje uogólniony wzór:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{\gamma_{R,e}} \left[\frac{c_{k,i}}{\gamma_c} + (\gamma_G W_{k,i} + \gamma_G G_{k,i} + \gamma_Q Q_{k,i} - u_{k,i} b_i) \frac{\tan \varphi_{k,i}}{\gamma_\varphi} \right] \right]}{\sum_{i=1}^n (\gamma_G W_{k,i} + \gamma_G G_{k,i} + \gamma_Q Q_{k,i}) \sin \alpha_i}$$

gdzie:
 $c_{k,i}$ – wartość charakterystyczna spójności gruntu zalegającego w podstawie i-tego bloku,
 $\varphi_{k,i}$ – wartość charakterystyczna kąta tarcia wewnętrznego gruntu zalegającego w podstawie i-tego bloku,
 b_i – szerokość i-tego bloku,

α_i – kąt nachylenia podstawy i-tego bloku do poziomu,
 $W_{k,i}$ – charakterystyczna wartość ciężaru i-tego bloku,
 $G_{k,i}$ – charakterystyczna wartość obciążenia stałego działającego na i-ty blok,
 $Q_{k,i}$ – charakterystyczna wartość obciążenia zmiennego działającego na i-ty blok.
 Powyższy uogólniony wzór jest możliwy do zastosowania w każdym z czterech podejść obliczeniowych.

Obliczenia numeryczne stateczności wielu przypadków skarp nasypów drogowych w ujęciu Eurokodu 7 – prowadzili m.in. autorzy prac [1], [2], wykorzystując do obliczeń własny, autorski program SMB (Andrzej Batog), przyjmujący algorytmy zgodne z wytycznymi wszystkich czterech podejść obliczeniowych Eurokodu 7. Przedstawione tam analizy dotyczyły stateczności skarp nasypów drogowych posadowionych na zróżnicowanych typach podłoża gruntowego przy budowie drogi ekspresowej S-8 (Wrocław – Syców).

Porównanie uzyskanych wyników wskazuje wyraźnie, że w przypadku analizy sta-

tecności skarp nasypów drogowych poszczególne podejścia obliczeniowe nie są równoważne, pomiędzy skrajnymi wynikami uzyskanymi w podejściu DA1-1 i podejściu DA2 – maksymalne różnice wynoszą około 60% wartości dla DA2.

Najbezpieczniejsze jest podejście DA2, w którym uzyskuje się najmniejsze wartości wskaźnika stateczności. Zatem powinno być ono stosowane w przypadkach bardzo słabego rozpoznania warunków podłoża, przy dużej zmienności gruntów występujących w analizowanym masywie gruntowym, bądź przy występowaniu nasypów niekontrolowanych. Również to podejście jest właściwe w przypadku ustalania wartości parametrów wytrzymałości metodami pośrednimi (na przykład wyłącznie na podstawie zależności korelacyjnych).

Pośrednie wyniki, bardzo do siebie zbliżone, przynoszą podejścia DA1-2 oraz DA3. Należy je zatem stosować do analizy stateczności skarp, których warunki geotechniczne zostały rozpoznane w stopniu średnim, a wartości parametrów wytrzymałości zostały po części wyznaczone za pomocą badań (na przykład w aparacie bezpośredniego ścinania). Podejścia DA1-2 oraz DA3 różnią się jedynie sposobem traktowania obciążeń zewnętrznych. Podejście DA3 jest bardziej właściwe do stosowania w przypadkach, w których obciążenia zewnętrzne są stałe, bądź zmieniają się w długim okresie czasu (na przykład w zboczach końcowych wyrobisk lub zwałowisk). Z kolei podejście DA1-2 jest bardziej poprawne w przypadku występowania zmiennych obciążeń o stosunkowo znacznej wartości (na przykład przy analizach stateczności skarp nasypów kolejowych).

Najwyższe wartości wskaźników stateczności daje podejście DA1-1, w którym analizę stateczności przeprowadza się z uwzględnieniem tylko charakterystycznych wartości parametrów wytrzymałości. To podejście winno być wybierane tylko w przypadku, gdy wartości parametrów wytrzymałości gruntów zostały wyznaczone metodami laboratoryjnymi i polowymi, zapewniającymi wysoki stopień rozpoznania warunków geotechnicznych.

Podsumowanie

Przedstawione w referacie wybiórcze problemy związane z posadowieniem obiektów infrastruktury transportowej wskazują, że budowa sieci dróg samochodowych oraz linii kolejowych naraża wiele problemów z racji liniowego charakteru ww. budowli. Jednakże należy stwierdzić, że w zakresie badań dotyczących rozpoznania podłoża gruntowego dostępna jest w kraju aparatura i sprzęt, który zapewnia dobre rozeznanie podłoża gruntowego zarówno w warun-

kach in situ, jak również w laboratorium. W zakresie rozpoznania podłoża gruntowego w laboratorium niezbędne będzie wdrożenie procedur oceny mrozoodporności gruntów z wykorzystaniem badań CBR.

W zakresie metod wzmacniania podłoża gruntowego za pomocą systemu kolumn (różnie ukształtowanych) bezproblemowo potrafimy zaprojektować i wykonać takie wzmocnienie. Dostępne są systemy monitoringu instalowane w nietypowych rozwiązaniach, dostarczające niezbędnych informacji w celu rozeznania zjawiska na przykład osiadania, naprężeń czy odkształceń podłoża. Wzmacnianie podłoża metodami chemicznymi bezpośrednio pod nawierzchniami drogowymi nie stanowi istotnego problemu.

Niezbędne jest opracowanie procedur pozwalających na lepszą i efektywniejszą kontrolę zagęszczenia nasypów formowanych z gruntów antropogenicznych.

Pilne wydaje się podjęcie prac w celu wprowadzenia metod i algorytmów oceny stateczności skarp nasypów i wykopów z wykorzystaniem zaleceń Eurokodu 7, w tym również wzmacnianych geosyntetykami. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Batog A., Stilger-Szydło E.: Stateczność skarp nasypów drogowych w ujęciu Eurokodu 7, Drogownictwo, nr 1, 2010, 18-21.
- [2] Batog A., Stilger-Szydło E.: Stateczność skarp nasypów modernizowanej drogi ekspresowej S-8 w ujęciu Eurokodu 7 i aktualnych przepisów krajowych, Drogownictwo, nr 2, 2010, 39-44.
- [3] Stilger-Szydło E.: Posadowienia budowli infrastruktury transportu lądowego. Teoria – Projektowanie – Realizacja. Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2005.
- [4] Szydło A.: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria Wymiarowanie Realizacja. Kraków, Polski Cement, 2004.
- [5] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- [6] PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- [7] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 14 maja 1997 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących autostrad płatnych. Dz. U. z dnia 19 czerwca 1997 r., Nr 62, poz. 392.
- [8] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 14 maja 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dz. U. z dnia 2 marca 1999 r., Nr 43, poz. 430.
- [9] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie. Dz. U. Nr 63, poz. 735.
- [10] PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
- [11] PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- [12] Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych, Część 1 i 2. GDDP, Warszawa 1998.
- [13] Light Drop-Weight Tester ZAG. 02. Operating Manual, Zorn Stendal Germany, 1996.
- [14] Autostrada Płatna A2 Świecko-Nowy Tomyl. Cz. 5.4. Łagów-Jordanowo. Obszar torfowy 15, km 59+955 ÷ 60+600. Projekt geotechniczny dla posadowienia nasypu na systemie GEC (dr inż. Raitheł, inż. Wethkamp-Reitmann), Würzburg, 30/11/2009.