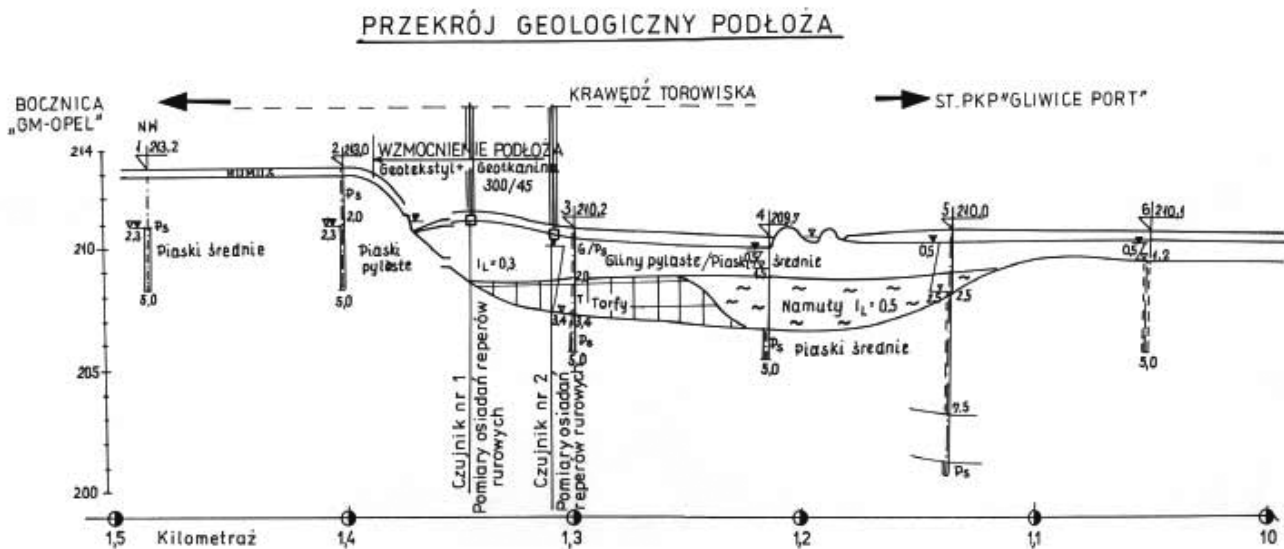


Analiza współpracy nasypu kolejowego i słabonośnego podłoża wzmocnionego geosyntetykami w świetle badań numerycznych i terenowych

Kazimierz Kłosek

Celem pracy jest prezentacja wyników badań numerycznych oraz terenowych nośności słabego podłoża nasypu kolejowego w warunkach stosowania technologii wzmocnień bazujących na wykorzystaniu materiałów geokompozytowych. Obiektem badań terenowych jest nasyp boczny kolejowy do GM-OPEL w Gliwicach.

Artykuł jest zmodyfikowaną wersją referatu wygłoszonego na V. Konferencji Naukowo-Technicznej "Problemy modernizacji i budowy podtorza kolejowego" Wrocław - Szklarska Poręba, 14-15 października 2010 r.



1. Profil geotechniczny podłoża pod nasypem kolejowym do GM-OPEL

Badania geotechniczne

Na podstawie badań hydro-geologicznych ustalono warunki geotechniczne posadowienia nasypu, co ilustruje rys.1. Nasyp o wysokości 3 ÷ 5 m odcinkowo został zlokalizowany na gruntach organicznych rodzimych reprezentowanych przez torfy i namuty w stanie plastycznym o miąższości do ~ 2,5 m, przykrytych warstwą glin pylastych laminowanych piaskami średnimi. Woda gruntowa posiada w tym rejonie napięte zwierciadło, niezależnie od silnego zawodnienia warstw przypowierzchniowych humusu przez lokalne ciekły depresyjne Kanału Kłodnicy. Sytuacja geotechniczna wskazywała zatem na szczególnie niekorzystne warunki dla bezpośredniego posadowienia nasypu kolejowego, kwalifikując podłoże do wglębnej wymiany gruntów lub posadowienia pośredniego na palach żwirowych (cementowo-gruntowych lub innych). Związane z tym koszty, poważne problemy technologiczne oraz krótki czas realizacji, spowodowały

rezygnację z tego tradycyjnego sposobu wzmocnienia podłoża na rzecz zastosowania konstrukcji geokompozytowych [1,2,3]. Przeprowadzone obliczenia nośności oraz stateczności zbrojonego nasypu dały podstawę dla konkretnych decyzji projektowych (rys.2).

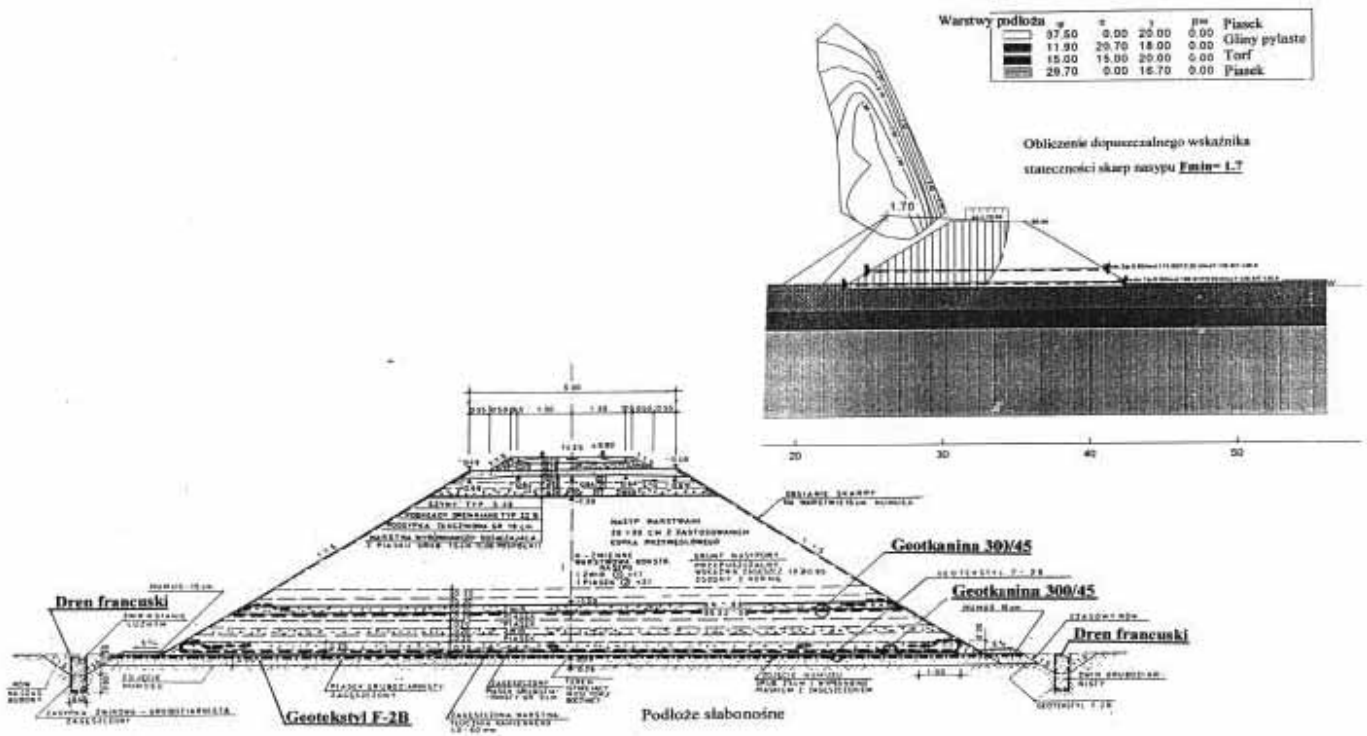
Dalsze obliczenia numeryczne umożliwiły ocenę wszystkich składowych stanu naprężenia i odkształcenia wraz z oszacowaniem zasięgu stref plastycznych i deformacji końcowych obiektu ze szczególnym uwzględnieniem efektywności zastosowanych wzmocnień. Prowadzone równoległe z procesem budowy nasypu badania i pomiary terenowe, dały podstawę dla weryfikacji założeń teoretycznych metodą tzw. analizy wstecznej.

Konstrukcja nasypu

Przyjęte założenia projektowo-wykonawcze polegały na zabudowie w podstawie nasypu tłuczniowego materaca w osłonie geokom-

pozytu (geotekstyl + geotkanina 300/45). Kolejne warstwy o łącznej miąższości ~ 1,5 m tworzą naprzemiennie żwir oraz piasek. Przykryte w górnej części materia kolejną warstwą wysokowytrzymałej geotkaniny, pełniącej tu rolę głównego elementu zbrojenia podłoża, składają się one na kompozytowy układ wzmocnienia strefy styku nasypu z podłożem.

Środkową (zasadniczą) część nasypu tworzy przepalony łupek przywęglowy. Odwodnienie podstawy nasypu na całej jego długości wykonano w formie drenu wglębnego (tzw. francuskiego) wykonanego z tłucznia 32/62 w pełnej osłonie geotekstylu z odprowadzeniem wody do lokalnego ciekłu. Odwodnienie takie, nie przewidywane dotąd w krajowych wytycznych projektowania [4], stanowi w tych warunkach skuteczny kompromis pomiędzy tradycyjnym odwodnieniem powierzchniowym w formie rowu otwartego i odwodnieniem wglębnym silnie zawodnionej podstawy nasypu.



2. Przekrój konstrukcyjny nasypu wraz z odwodnieniem podłoża dla przyjętych założeń obliczeniowych nośności i stateczności w warunkach zbrojenia podstawy geotkaniną

Program badań terenowych

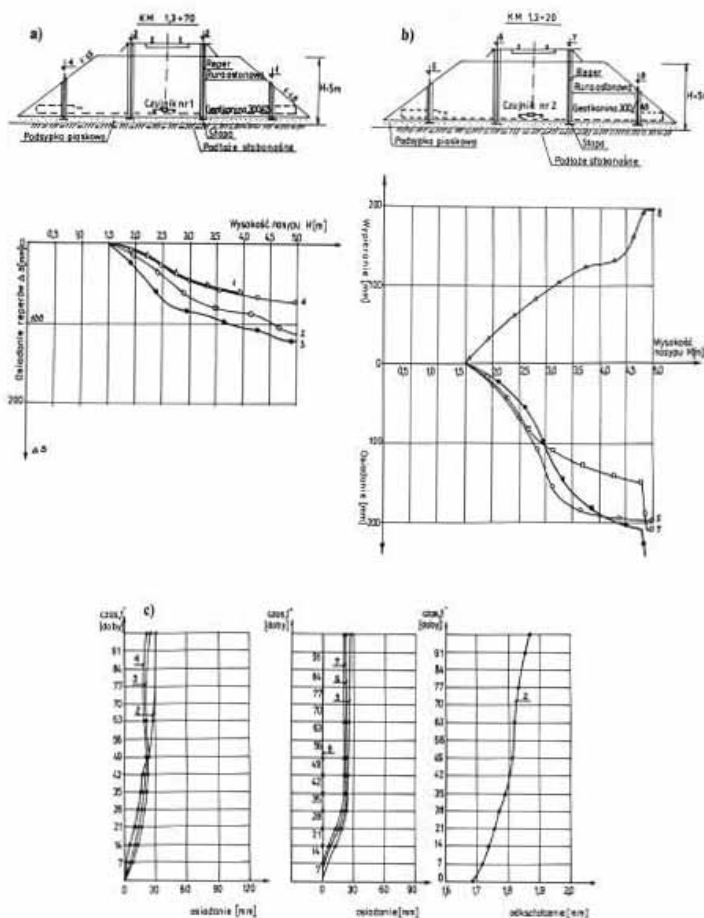
Program badań terenowych obejmował głównie pomiary osiadań podstawy nasypu w kolejnych fazach wzrostu jego wysokości oraz pomiar mobilizacji sił rozciągających w zbrojeniu tj. warstwie geotkaniny.

Pomiary realizowano w dwóch przekrojach (rys.1) instalując każdorazowo cztery stalowe repery wgłębne w rurach osłonowych, posadowione na stalowych stopach w obrębie dobrze zagęszczonej podsypki piaskowej (rys. 3a).

W każdym osiowym przekroju badawczym dla oceny relacji „odkształcenie – naprężenie” zainstalowano po jednym przetworniku indukcyjnym PSX-10, wyprowadzając kable poza obris nasypu. Czujnik został uprzednio przytwierdzony do geotkaniny za pomocą odpowiednich łączników i zabezpieczony od góry stalową formą przed zgnieciem w czasie realizacji robót ziemnych. Odczyty wskaźników wykonywano za pomocą wzmacniacza pomiarowego MDL-108. Geotkanina rozkładana prostopadle do osi nasypu posiadała wstępny, kontrolowany naciąg, co uwzględniono w trakcie „zerowania” wskaźników przed ich zasypaniem.

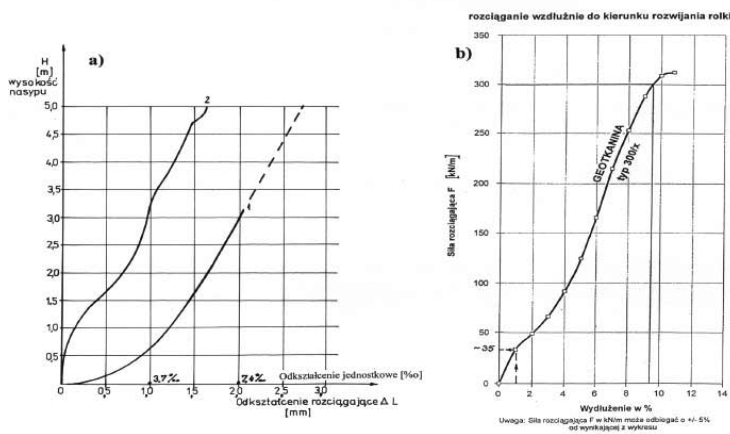
Pomiarów osiadań reperów oraz wskaźników czujników odkształceń dokonywano systematycznie w trakcie wznoszenia nasypu do jego pełnej wysokości (5 m) jak i do czasu pełnej stabilizacji osiadań w procesie konsolidacji podłoża tj. przez okres ~ 3-ch miesięcy. Wyniki pomiarów ilustruje rys. 3 i rys. 4.

Lokalizacja przekrojów badawczych umożliwiała ocenę zróżnicowanego wpływu podłoża na stan jego nośności.

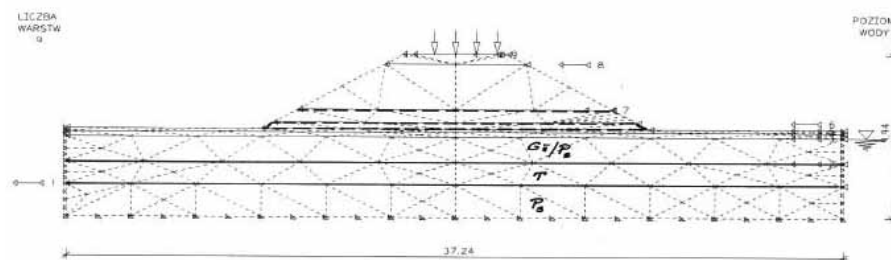


3. Lokalizacja reperów wgłębnych oraz czujników odkształceń w podstawie nasypu wraz z rejestracją osiadań:

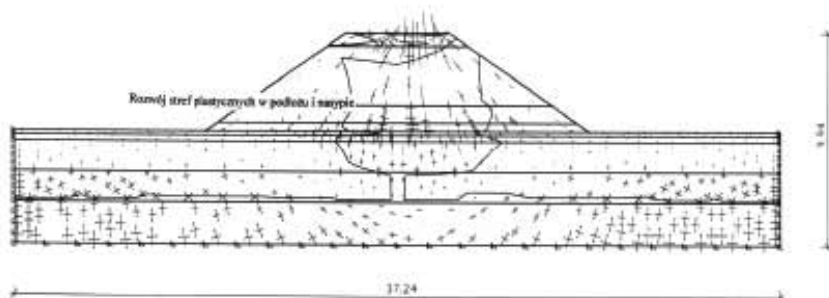
- przekrój w KM 1,3+70,
- przekrój w KM 1,3+20,
- stabilizacja osiadań podłoża oraz odkształceń geotkaniny w czasie



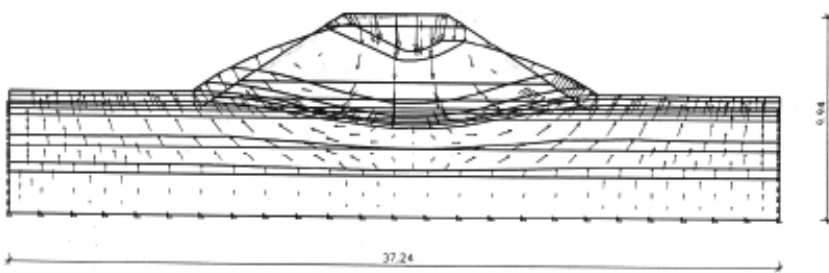
4. Mobilizacja siły rozciągania w geotkaninie na etapie wznoszenia nasypu



5. Założenia obliczeniowe (MES) dla nasypu ze wzmocnieniem geotkaniną jak i bez wzmocnienia



6. Rozwój stref plastycznych w podłożu i nasypie bez wzmocnienia (A)



7. Rozwój stref plastycznych w podłożu i nasypie bez wzmocnienia (A)

W przekroju I (czujnik 1) decydujące znaczenie dla wielkości osiadań posiadała warstwa plastycznych glin pylastych (2,4 m), w przekroju – II słabonośne podłoże tworzyła dodatkowo warstwa torfów (razem ~ 3 m).

Wyniki badań oraz ich analiza

Pomiary osiadań w przekroju - I dla etapu budowy wskazują na wielkości przemieszczeń pionowych w granicach 80 mm na

skarpach do 115 mm na korpusie torowiska. Etapowi temu odpowiadał szybki wzrost wysokości nasypu 0 ÷ 5,0 m. Pełnej stabilizacji osiadań nasypu o docelowej wysokości $H=5$ m odpowiadały dodatkowe przyrosty ~ 20 ÷ 30 mm (po ~ 3-ch mies.), co dawało sumaryczne osiadania w tym przekroju ~ 100 ÷ 145 mm (rys. 3a).

W przekroju - II (na torfie) osiadania etapu budowy nasypu stabilizują się w granicach 200 mm, przy równoczesnym lokalnym

wypiętrzeniu podłoża (rep. 8) pod skarpą ~ 200 m. Należy nadmienić, że wypiętrzenie nastąpiło już w początkowej fazie budowy nasypu na skutek nierównomiernego rozkładu obciążeń (mas ziemnych) skoncentrowanych w części przyskarpowej, co należy uznać za błąd wykonawczy. Zalecenie równomiernego obciążania podłoża na całej szerokości korpusu ziemnego nie zostało w tym rejonie zachowane.

Osiadania nasypu o docelowej wysokości przyrastały bardzo równomiernie dla całego korpusu ziemnego (rys. 3b) o kolejne ~ 25 ÷ 28 mm, co daje końcowe osiadania rzędu 230 mm.

W chwili obecnej, tj. po upływie około 10 lat od oddania bocznic do eksploatacji, nie obserwuje się praktycznie żadnego dalszego przyrostu osiadań konsolidacyjnych podłoża, jak i samego nasypu mimo kilkukrotnego, pełnego podtopienia jego podstawy przez powierzchniowe cieki odwadniające cały obszar fabryki GM Opel w wyniku powodzi.

Można wnioskować, że wzrost osiadań początkowych oraz redystrybucja naprężeń stycznych w strefie kontaktowej nasypu z podłożem prowadziła do stopniowej mobilizacji sił rozciągających w geotkaninie, co ilustruje rys. 4. Odkształcenia końcowe geotkaniny dla etapu budowy wahały się w granicach 6 ÷ 10 ‰. W kolejnym okresie konsolidacji podłoża poddanego oddziaływaniu grawitacyjnemu nasypu o pełnej wysokości $H=5$ m w warunkach dodatkowych obciążeń eksploatacyjnych taboru odkształcenia te przyrosły o ~ 0,7 ‰, co docelowo odpowiada maksymalnej sile rozciągającej $F < 35$ kN/m.

Jak wynika z wykresu na rys. 4 siła ta, wobec przyjętego zapasu bezpieczeństwa, przyczyniła się do mobilizacji jedynie ~ 11 % maksymalnej wytrzymałości na rozerwanie geotkaniny 300/45 kN/mb.

Badania numeryczne

Obliczenia stateczności wykonano dla cylindrycznej powierzchni poślizgu na bazie oprogramowania pozwalającego symulować dowolne parametry geometryczne, jak i geotechniczne, podłoża obciążonego konstrukcją nasypową ze skarpami wzmocnionymi geosyntetycznym zbrojeniem (rys. 2). Kolejne fazy doboru parametrów poziomego zbrojenia geosyntetycznego pozwoliły uzyskać założoną wartość dopuszczalnego wskaźnika stateczności przy kontrolowanych parametrach reologicznych geokompozytu.

Szczegółową analizę numeryczną MES zadania przeprowadzono z wykorzystaniem programu Hydro-Geo, gwarantującego automatyczną dyskretyzację podłoża (rys. 5). Spośród szeregu możliwych opcji oblicze-

niowych jako charakterystyczne i miarodajne dla dalszych analiz przytoczono w pracy rezultaty ilustrujące: rozwój stref plastycznych w podłożu i nasypie, pola deformacji nasypu i podłoża, dla układu bez wzmocnienia oraz z geosyntetycznym wzmocnieniem.

Analiza porównawcza obu przypadków wskazuje na zasadniczo odrębny charakter współpracy nasypu i słabonośnego podłoża.

W przypadku nasypu pozbawionego geosyntetycznego wzmocnienia uplastycznieniu podlegało by praktycznie całe „jądro” korpusu ziemnego oraz bezpośrednio podłoże środkowej części nasypu, co ilustruje rys. 6a. Efektem utraty wytrzymałości gruntu w tych strefach są trwałe deformacje nasypu według schematu przedstawionego na rys. 7a. Nieckowatym obniżeniom torowiska i podstawy nasypu towarzyszyło by wypiętrzenie jego podstawy w częściach przy-skarpowych połączone z „wybrzuszeniem” prostoliniowych skarp. Układ geotechniczny warstw mógł przyczynić się do wyporu podłoża w obrębie najsłabszych warstw, tj. glin pylastych oraz torfów po stropie niżej zalegającej warstwy piasków. Przemieszczenia mają składowe pionowe oraz poziome, co wskazuje zarówno na wzrost osiadań korpusu nasypu (utrata nośności), jak i mobilizację ruchów osuwiskowych.

Przedstawiony obraz zjawisk ma tu charakter hipotetyczny, a jego realność potwierdzają przypadki licznych awarii nasypów w zbliżonych warunkach geotechnicznych.

Zgoła odmienny charakter posiada współpraca słabonośnego podłoża i nasypu ze zbrojeniem dolnych warstw geokompozytami. Ograniczony zakres stref plastycznych koncentrujących się głównie w warstwie torfów sprawia, że osiadania mają tu wyłącznie charakter przemieszczeń pionowych. Brak składowych przemieszczeń poziomych wynika bezpośrednio z faktu aktywizacji geosyntetycznego zbrojenia u podstawy nasypu. Odształcenia te mają znacznie mniejszą wartość i nie powodują w zasadzie żadnych deformacji przekroju poprzecznego nasypu. Fakt ten został potwierdzony w trakcie niemal 10-letnich obserwacji i badań poligonowych. Osiedlenia reperów docelowego nasypu mają zbliżoną wartość, co ilustruje rys. 3c. Można zatem wnioskować, iż numeryczny schemat pracy zbrojonego nasypu na słabonośnym podłożu jest adekwatny do wyników pomiarów terenowych. Jest on przy tym zasadniczo różny dla obu przypadków – „ze wzmocnieniem” i przy jego braku. Zasadniczą korzyścią jest tu zatem, w odniesieniu do nasypu zbrojonego, jego trwałość eksploatacyjna (brak stref plastycznych) oraz minimalizacja osiadań, połączona z ich szybką stabilizacją w czasie.

Zasadniczy wpływ na istotę rejestrowanych zjawisk ma dobór geotekstyliów, który uwzględniał materiały gwarantujące trwa-

łość rozwiązania konstrukcyjnego min. 114 (120) lat [5]. Podejścia takiego nie gwarantują oferenci większości dostępnych na krajowym rynku materiałów geosyntetycznych.

Wnioski

Terenowa weryfikacja obliczeń numerycznych w zakresie konstrukcji z gruntów zbrojonych wciąż jeszcze należy w kraju do działań sporadycznych. Mieści się ona w ramach tzw. monitoringu fazy eksploatacji obiektu, i powinna być obligatoryjna w szczególnie złożonych warunkach gruntowo-wodnych. Potwierdzenie odmiennego charakteru współdziałania komunikacyjnych budowli ziemnych ze słabonośnym podłożem posiada zbyt małą bazę doświadczalną. Rodzi to zarazem zachętę do nazbyt swobodnych i z reguły całkowicie nieuzasadnionych prób „podmiany” materiałów geosyntetycznych, głównie przez wykonawców, jak i nieuczciwych dystrybutorów. Wyłączne kryterium cenowe nie może być tu wiarygodnym (jest często jedynym) parametrem podejmowanych w tym zakresie decyzji inwestorskich.

Gwarancja trwałości i niezawodności konstrukcji z gruntu zbrojonego wymaga zatem:

- dobrej znajomości metod obliczeniowych [5],
- umiejętnego doboru materiałów geosyntetycznych i kompozytowych, ze szczególnym uwzględnieniem ich cech reologicznych poprzez uwzględnienie wytrzymałości długotrwałej zarówno materiału (surowca) jak i konstrukcji,
- właściwej technologii transportu, rozładunku a zwłaszcza rozkładania, łączenia i formowania konstrukcji z tego typu materiałów, zgodnych z obecnym stanem techniki i sztuki inżynierskiej w zakresie geosyntetyków.

Krótki okres budowy bocznicy (3 miesiące) praktycznie eliminował tradycyjne technologie wzmocnień podłoża, jak i jego przyspieszonej konsolidacji. Uzyskana, w okresie kolejnych 2÷3 miesięcy, pełna stabilizacja osiadań nasypu na bardzo słabym podłożu, świadczy o trafnym doborze rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych [1,2].

Zastosowana technologia rowów zagłębionych typu „dren francuski” spełniła funkcję trwałego drenażu powierzchniowego oraz wgłębny będąc zarazem istotnym wzmocnieniem stref przy skarpowych podłoża nasypu na przesuw poprzeczny. ◀

Literatura:

- [1] Ajdukiewicz J.: Modernizacja podtorza a zastosowanie geosyntetyków. Mat. Konf. Nauk.-Techn. „Problemy modernizacji i naprawy podtorza kolejowego”, Wrocław-Żmigród, 2000r.
- [2] Kłosek K.: The diagnostic of new permanent way type under the conditions of great service load of rolling stock. International Heavy Haul Railway Conference „Running Heavy – Running Fast into the 21st Century”, Montreal, Quebec, Canada, 1996.
- [3] Kłosek K.: Earthen Structures for Transportation Purposes in Mining Areas Reinforced with Geosynthetics International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering – ISISS'2009. South China University of Technology Press, Volume 1, Guangzhou /Kanton- China, 2009; p.239-244.
- [4] Id-3. Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego. PKP PLK S.A. Warszawa 2009.
- [5] Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami. Instrukcje, Wytyczne, Poradniki Nr 429/2007, ITB-Warszawa 2007.

dr hab. inż. Kazimierz Kłosek
prof. Politechniki Śląskiej
Politechnika Śląska w Gliwicach