Sandra TAMAKA¹

WPŁYW PRZEPUSZCZALNOŚCI GRUNTU NA STATECZNOŚĆ NASYPU KOLEJOWEGO

Woda, która pojawia się w obszarze nasypu kolejowego lub drogowego wywiera ogromny wpływ na stan techniczny budowli, zwłaszcza na jego stateczność. W artykule przedstawiono przyczyny obecności wody w sąsiedztwie budowli ziemnych pochodzenia naturalnego (związanego z obiegiem wody w przyrodzie) oraz spowodowanej działalnością człowieka. Wskazano główne przyczyny powstawania zalewisk na terenach górniczych. Przedmiotem numerycznej analizy był model 2D rzeczywistego nasypu kolejowego, którego geometrię oraz parametry materiałowe przyjęto na podstawie udostępnionej dokumentacji projektowej. W trakcie analizy, wykonanej w programie Z_Soil, badano stateczność nasypu, wariantując warunki jego funkcjonowania (praca nasypu w przypadku braku wpływu wody na konstrukcję ziemną oraz w warunkach podtopienia). Wobec stwierdzonej niestateczności nasypu w warunkach suchych, opracowano koncepcję wymiany gruntu. Następnie oszacowano stateczność tak wzmocnionego nasypu w warunkach podtopienia. Z uwagi na degradujący wpływ wody na nasyp przeanalizowano możliwość poprawy jego stateczności przez zastosowanie materiałów o różnej przepuszczalności oraz różnych modułach odkształcenia. Nasypy budowane z materiału bardziej przepuszczalnego wymagają uzyskania wyższego modułu odkształcenia. Wyniki analiz przedstawiono w postaci wektorów przepływu oraz map przemieszczeń i naprężeń.

Słowa kluczowe: nasyp kolejowy, podtopienie, model numeryczny, współczynnik stateczności, współczynnik przepuszczalności

1. Zagrożenie nasypów podtopieniem

1.1. Wstęp

W odpowiedzi na coraz to większe zapotrzebowanie na transport, inżynierowie często stoją przed trudnym wyzwaniem, jakim jest wybór najkorzystniejszego wariantu przebiegu dróg (kołowych i szynowych), zarówno pod względem bezpieczeństwa użytkowników i środowiska naturalnego, ale również opłacalności z punktu widzenia ekonomii.

¹ Autor do korespondencji: Sandra Tamaka, Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 5, Sandra.Tamaka@polsl.pl

Z uwagi na szybki rozwój urbanizacji oraz stale powiększające się obszary degradacyjnego wpływu górnictwa podziemnego i odkrywkowego, inżynierowie coraz częściej zmuszani są do wyboru „trudnych geologicznie” terenów pod zabudowę.

Do takich lokalizacji zaliczane są obszary zalewowe, w których nasypy kolejowe często pełnią dodatkową funkcję ochronną i z tego względu są wznoszone jako budowle hydrotechniczne. Skomplikowane i ciężkie warunki gruntowo-wodne pociągają za sobą konieczność stosowania nowoczesnych metod projektowych i zaawansowanych technologii budowania.

W praktyce inżynierskiej najczęściej mamy do czynienia z dwiema sytuacjami projektowymi. Pierwsza z nich dotyczy projektowania nowego obiektu w wybranej, najkorzystniejszej lokalizacji. Projekt ten uwzględnia zakładane warunki pracy budowli, w tym warunki posadowienia, obciążenia oraz przewidywany okres eksploatacji. Nowobudowane nasypy kolejowe są zabezpieczane przed negatywnym wpływem wody.

Trudniejsza sytuacja projektowa występuje, gdy warunki eksploatacji już istniejącego i użytkowanego obiektu zmieniają się na bardziej niekorzystne. Budowla, która z założenia była przygotowana do przenoszenia mniejszych obciążeń (nieuwzględniających wpływu wody zalewowej), często w nowych okolicznościach nie może być użytkowana, ponieważ zagraża to życiu jej użytkowników, a bezpośrednio, bezpieczeństwu samej konstrukcji. W takiej sytuacji należy rozpatrzyć możliwości

- a) przywrócenia warunków, na które budowla była projektowana (np. poprzez zmniejszenie obszaru zlewni
- b) przebudowy obiektu, by poprawić jego parametry techniczne i użytkowe, które umożliwią ponowne, bezpieczne użytkowanie nasypu.

1.2. Główne przyczyny obecności wody w obszarze nasypu kolejowego

Na stan konstrukcji nasypu kolejowego ogromny wpływ ma woda, która pojawia się w jego obszarze z przyczyn naturalnych i losowych (powódzie) oraz woda, której napływ powodowany jest działalnością człowieka.

1.2.1. Przyczyny naturalne

Naturalna obecność wody w obszarze budowli ziemnej związana jest z jej obiegiem w przyrodzie. Woda ta występuje jako [2]:

- a) woda atmosferyczna (deszcz, śnieg, mgła), która zasila wody powierzchniowe i podziemne,
- b) woda powierzchniowa (zarówno słona jak i słodka), występująca na powierzchni Ziemi,
- c) woda podziemna, znajdująca się pod powierzchnią ziemi, wypełniająca pustki, szczeliny i pory skalne.

Opady atmosferyczne mają znaczący wpływ na trwałość konstrukcji nasypów kolejowych, w zależności od ich intensywności oraz czasu trwania opadu. Średnie roczne sumy opadów w Polsce oscylują w granicach 600 mm [5].

Opady atmosferyczne zasilają wody powierzchniowe, a te mogą stanowić przeszkodę w budowie nowych tras komunikacyjnych. Według Ministerstwa Infrastruktury [6] szacuje się, że do roku 2030 może wystąpić prawie 5 tys. kolizji linii kolejowych z ciekami i zbiornikami wodnymi. Przeszkody znajdujące się w ciągu tras komunikacyjnych nie zawsze pokonywane są przy pomocy wznoszonych w tym celu obiektów inżynieryjnych. Zdarzają się sytuacje, w których ruch kołowy prowadzony jest nasypem przez wody powierzchniowe.

Ilość wody przypadająca na kilometr linii kolejowej związana jest z wielkością odpowiadającej zlewni. Zazwyczaj są to niewielkie ilości, które nie zagrażają bezpośrednio stateczności konstrukcji. Nasypy kolejowe budowane są w taki sposób, by ewentualne szkody wywołane wodami pochodzenia naturalnego były łatwe do naprawy, szybkie i stosunkowo niedrogie.

Zdarzają się jednak sytuacje, gdy ilość wody pochodzącej z opadów lub roztopów jest tak duża, iż dochodzi do powstania powodzi. Taka sytuacja miała miejsce w 2010 roku w Radomierzycach, gdzie woda wymyła nasyp kolejowy na odcinku 30-40 m [13].

1.2.2. Przyczyny obecności wody w obszarze nasypu kolejowego związane z działalnością człowieka

Ogromny wpływ na zmiany zachodzące w przyrodzie, a w tym w gospodarce wodnej, odgrywa działalność człowieka, niejednokrotnie podyktowana koniecznością poprawy własnego bezpieczeństwa oraz chęcią polepszenia warunków bytowych.

Powszechnie budowane są poldery (suche zbiorniki na wodę), zapory i zbiorniki retencyjne, w celu zabezpieczenia miejsc zamieszkania lub gromadzenia zapasów wody na wypadek suszy. Przykładem może być powstający w tej chwili przeciwpowodziowy zbiornik Racibórz Dolny na rzece Odrze, którego zadaniem będzie ochrona terenu w dolinie Odry od Raciborza do Wrocławia.

Dodatkowo wykonuje się sztuczne przerzuty wody między dorzeciami oraz reguluje przepływy wód w rzekach. Działania te bezpośrednio wpływają na strukturę obiegu wody w przyrodzie i mogą powodować lokalne osuszanie terenów podmokłych lub nawadnianie obszarów wcześniej suchych.

Kolejnym przykładem działań, których skutki mają niekorzystny wpływ na warunki wodne jest podziemna eksploatacja górnicza. Wydobywaniu kopalin użytecznych towarzyszą deformacje powierzchni terenu, o charakterze ciągłym i nieciągłym [9], z którymi związane są zmiany warunków hydrogeologicznych.

Jednym z objawów tych zmian jest wystąpienie nieraz bardzo rozległych obszarów podtopień, których główną przyczyną są obniżenia terenu w postaci

niecek obniżeniowych. W takich miejscach może gromadzić się woda opadowa i roztopowa [Rys.1]. Jeżeli w zasięgu niecki obniżeniowej znajduje się nasyp, może on zostać podtopiony lub nawet zalany. Często w takich sytuacjach konieczne jest wybudowanie przepustu, który umożliwi przeprowadzenie wody napływowej z jednej strony nasypu na drugą.

Na obszarach objętych szkodami górniczymi dochodzi także do tzw. pozornego podwyższenia poziomu wód gruntowych [Rys. 2]. Powstają niecki obniżeniowe, które swoim zasięgiem wykraczają poza kontur eksploatacji górniczej [9]. Na skutek wydobywania kopalin w górotworze tworzą się pustki zwane wyrobiskami [8]. W zależności od stosowanego systemu zabezpieczeń stropu przed załamaniem (lub jego braku – tzw. eksploatacja z zawalem), w różnym stopniu dochodzi do jego pionowego przemieszczenia i w konsekwencji obniżenia terenu na powierzchni (w).

W zależności od tego jak bardzo w stosunku do poziomu wody obniży się teren, można spotkać się albo z zawilgoceniem gruntu, albo z wypłynięciem wody powyżej poziomu dna niecki obniżeniowej, czyli z podtopieniem [Rys.2]

Rys. 1. Spływ wody deszczowej do najniższego punktu

Fig. 1. The rain water flows over the ground to the lowest point

Rys. 2. Powierzchnia terenu poniżej poziomu wody gruntowej – podtopienie

Fig. 2. The surface of the area below the level of ground water – flooding

2. Ocena wpływu wody na stateczność nasypu kolejowego na podstawie analizy numerycznej

Wpływ wody na stateczność zboczy sprawdzono na podstawie analizy MES dwóch modeli tego samego przekroju nasypu kolejowego linii dwutorowej:

- a) model nr 1 - parametry gruntów budujących nasyp są zgodne z dokumentacją geologiczno-inżynierską,
- b) model nr 2 - nasyp zbudowany z gruntów gwarantujących jego stateczność w normalnych warunkach pracy.

Obliczenia przeprowadzono przy użyciu studenckiej wersji geotechnicznie zorientowanego programu Z_Soil 2011 Student, który umożliwia m.in. określać nośność i stateczność budowli ziemnych, rozpatrywać wpływ deformacji górniczych na te budowle i badać przebieg przepływu cieczy. Z uwagi na liniowy charakter nasypu kolejowego, zdecydowano się na opracowanie odwzorowujących go numerycznych modeli jako dwuwymiarowych (płaski stan odkształcenia).

2.1. Geometria przekroju

W obydwu przypadkach obliczeniowych, numeryczne modele nasypu kolejowego [Rys. 3] zostały wykonane na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [1]. Zachowane zostały: kształt przekroju nasypu (w tym niesymetryczność skarp), jego wysokość i szerokość, a także nierówność poprzeczna torowiska.

2.2. Parametry materiałowe

W wykonanych modelach [10] uwzględniono, zgodnie z dokumentacją, warstwową budowę podłoża oraz nasypu kolejowego odwzorowując położenie poszczególnych warstw i ich wzajemny układ, miąższości oraz parametry geotechniczne [Tabela 1].

Z uwagi na brak danych w dokumentacji na temat właściwości filtracyjnych gruntów nasypu oraz podłoża, w analizie posłużono się orientacyjnymi dla określonego rodzaju gruntu, wartościami współczynników filtracji Darcy'ego według [11], zestawionymi w tabeli 1.

Rys. 3. Przekrój geotechniczny nasypu kolejowego; opis w tekście i w tabeli 1 [10]

Fig. 3. Geotechnical section of railway embankment [10]

Tabela 1. Zestawienie parametrów geotechnicznych (na podstawie [7, 11])

Table 1. Summary of geotechnical parameters (based on [7, 11])

Oznaczenie warstwy geotechnicznej		Rodzaj gruntów	Gęstość	Ciężar objętościowy	Kohezja	Kąt tarcia wewnętrznego	Edometryczny moduł ścisłości	Współczynnik Darcy'ego
			ρ [t m ⁻³]	γ [$\frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$]	c_u [kPa]	ϕ_u [°]	M_o [MPa]	$\frac{K_y'}{K_x'}$
1	NI	tluczeń kolejowy	2,24 ¹⁾	22,0	50,0	39,0	323,1 ²⁾	150 ³⁾
2	nllc-a	piasek gliniasty oraz pospółka	2,15	21,09	16,1	14,5	28,1	0,1
3	nllc-b ⁴⁾	glina piaszczysta	2,10	20,6	22,1	16,4	37,2	0,01
4	nllc-b ⁵⁾	glina piaszczysta	2,10	20,6	22,1	16,4	37,2	0,2
5	nlb-2b	piasek średni z domieszkami i przewarstwieniami	1,70	16,68	2,0	32,2	101,5	10
6	lb-2a	piaski średnie i grube z domieszkami i przewarstwieniami	1,70	16,68	2,0	32,4	79,3	10
7	lb-2b	piaski średnie i grube z domieszkami i przewarstwieniami	1,70	16,68	2,0	33,1	96,3	10
8	Vllb	zwietrzeliny gliniaste	2,00	19,62	11,6	24,0	24,0	1 ³⁾
9	Vllc	zwietrzeliny gliniaste	2,10	20,60	14,5	26,1	42,2	1 ³⁾
10	IX	dolomit, łupek, piaskowiec	1,97 ¹⁾	19,3	5,0	34,4	114,6 ²⁾	0,0001

¹⁾ wartość wyznaczona z zależności: $\rho = \frac{\gamma}{9,81}$,

²⁾ z powodu braku danych przyjęto moduł odkształcenia E_0 [MPa],

³⁾ z powodu braku danych przyjęto wartość orientacyjną [11],

⁴⁾ dotyczy modelu nasypu z wymienionym gruntem (opis w pkt. 2.5),

⁵⁾ dotyczy opcji nasypu z wymienionym materiałem na bardziej przepuszczalny (opis w pkt. 2.5)

2.3. Model konstytutywny gruntu w podłożu i nasypie

W numerycznej analizie wpływu podtopienia na nasyp kolejowy grunty warstwy podłoża i nasypu modelowano przy użyciu sprężysto-idealnie plastycznego modelu Coulomba-Mohra, którego powierzchnia plastyczności opisana jest w postaci [3]:

$$F(\sigma') = 0 \quad (1)$$

gdzie $F(\sigma')$ jest skalarową funkcją wektora naprężenia efektywnego.

Model ten należy do najpopularniejszych, głównie z powodu łatwości identyfikacji jego parametrów, w tym: modułu sprężystości E , współczynnika Poissona, kąta tarcia wewnętrznego oraz kohezji.

2.4. Dyskretyzacja, warunki brzegowe i początkowe

Numeryczny model nasypu 2D zbudowano przy użyciu elementów typu *continuum*, stosując elementy trój- i czterowęzłowe. Liczba węzłów w modelu: 3669, liczba elementów: 3509.

Formułowanie warunków brzegowych i początkowych polegało na wyznaczeniu sposobu podparcia i obciążenia modelowanego masywu gruntowego. Zadane warunki początkowe, związane z geometrią nasypu i wyznaczeniem stref materiałowych, bezpośrednio charakteryzują naprężenia pierwotne występujące w masywie. Określenie warunków brzegowych to odpowiednie zamocowanie brzegowych węzłów obszaru. Na pionowych brzegach modelu wprowadzono podpory przegubowo-przesuwne, umożliwiające swobodne pionowe przemieszczenie, oraz podpory przegubowo-nieprzesuwne na dolnej jego krawędzi.

Rys. 4. Zadane warunki początkowe i brzegowe, podział na elementy skończone; opis w tekście [10]

Fig. 4. Initial and boundary conditions, the division into finite elements [10]

Na nasyp kolejowy przyłożono obciążenie równomiernie rozłożone na całej szerokości podsypki o wartości 40 kN/m^2 . Dodatkowo wprowadzono obciążenie w postaci parcia wody na prawą skarpę nasypu. Na rysunku 4. przedstawiono fragment wykonanego modelu wraz z nałożoną siatką elementów skończonych i przyłożonym obciążeniem.

2.5. Program analizy, prezentacja i dyskusja wyników

Punktem wyjścia do rozważań na temat wpływu wody na stateczność nasypu w zależności od współczynnika przepuszczalności była analiza modelu nasypu

pu w warunkach suchych bez przyłożonego obciążenia w postaci parcia wody. Zgodnie z [4, 12] współczynnik stateczności SF podtorza powinien wynosić co najmniej:

- a) 2,0 – dla podtorza nowobudowanego i dobudowywanego,
- b) 1,5 – w eksploatacji,
- c) 1,3 – bezpośrednio po naprawie podtorza.

Uzyskane wyniki wskazały na niewystarczającą stateczność prawego zbocza, ponieważ wyznaczona wartość współczynnika stateczności SF wyniosła 1,46.

Z tego względu, do dalszej analizy postanowiono posłużyć się modelem nasypu, którego geometria nie ulegnie zmianie, natomiast materiał budujący nasyp zostanie wymieniony na grunt o lepszych parametrach, tzn. gwarantujących stateczność budowli w warunkach suchych [patrz tabela 1]. Nowy grunt (głina piaszczysta) charakteryzuje się większym kątem tarcia wewnętrznego, wyższą wartością edometrycznego modułu ścisłości i jest bardziej spójny w stosunku do pierwotnie występującego materiału.

Po zmianie materiału budującego nasyp na glinę piaszczystą, uzyskano wyraźną poprawę stateczności skarpy nasypu – współczynnik stateczności skarpy nasypu w warunkach suchych wyniósł 1,71.

Kolejny etap analizy polegał na wykonaniu i sprawdzeniu stateczności nasypu pracującego w warunkach podtopienia [Rys. 5]. Prawą skarpe wcześniej wykonanego modelu nasypu (w całości wykonanego z gliny piaszczystej) dodatkowo obciążono parciem wody.

W wyniku oddziaływania wody, nasyp, który w warunkach suchych wykazywał wystarczającą stateczność, w warunkach podtopienia okazał się niestateczny, a uzyskany współczynnik stateczności SF wyniósł 1.

Rys. 5. Program analizy

Fig. 5. Stages of the analysis

Jednym z efektów wykonanej analizy numerycznej są mapy przepływów wody przez nasyp. Na rys. 6. przedstawiono wektory przepływu wody. Można zauważyć, iż woda najswobodniej przepływa przez warstwy podłoża, które zbudowane są z piasku średniego i grubego. Są to warstwy, które charakteryzują się wyższym współczynnikiem filtracji niż materiał, z którego zbudowano nasyp.

Rys. 6. Wektory przepływu wody – lewa skarpa[10]

Fig. 6. Velocity vectors – the left slope [10]

Dodatkowo zdecydowano sprawdzić, jaką wartością modułu odkształcenia powinien wykazywać grunt nasypu (przy zachowaniu pozostałych parametrów geotechnicznych), tak by konstrukcja była stateczna. W kolejnych krokach iteracyjnych określono graniczną wartość modułu, która wyniosła około 47 MPa. Jest to wartość wyższa od wcześniej przyjmowanej ($E = 37,2$ MPa). W wykonanej analizie z zastosowaniem wyższego modułu odkształcenia wartość współczynnika stateczności wyniosła $SF = 2,2$.

W kolejnych etapach analizy wykonano sprawdzenie, jaki wpływ na stateczność konstrukcji pracującej w warunkach podtopienia ma przepuszczalność materiału budującego nasyp. Rozpatrzono sytuację, w której wymieniony materiał nasypu jest bardziej przepuszczalny, tzn. cechuje go wyższy współczynnik filtracji, $K_x' = K_y' = 0,2$ (patrz tabela 1.), przy zachowaniu wartości pozostałych parametrów geotechnicznych.

Na podstawie wygenerowanych przez program Z_Soil map przemieszczeń [Tabela 1.], można zauważyć, iż nasyp, który zbudowany jest z bardziej przepuszczalnego materiału (B) wykazuje większe przemieszczenia pionowe, przemieszczenia poziome zgodne z kierunkiem przepływu wody również są większe. Wartości bezwzględne naprężeń pionowych w porównaniu do naprężeń występujących w nasypie zbudowanego z materiału mniej przepuszczalnego (A) są mniejsze.

Pomimo zastosowania materiału o wyższym współczynniku filtracji, zbocze nasypu w dalszym ciągu pozostaje niestateczne, współczynnik SF jest równy 1.

Tabela 2. Zestawienie parametrów geotechnicznych [na podstawie 7, 11]

Table 2. Summary of geotechnical parameters [based on 7, 11]

WARUNKI PRACY: PODTOPIENIE	
A) Grunt nasypu mniej przepuszczalny: $K_x' = K_y' = 0,01$, B) Grunt nasypu bardziej przepuszczalny: $K_x' = K_y' = 0,2$.	
$u_{y/x \text{ max/min}}$ – wartość maksymalnego/minimalnego przemieszczenia pionowego/poziomego, $\sigma_{y/x \text{ max/min}}$ – wartość maksymalnego/minimalnego naprężenia pionowego/poziomego.	
MAPY PRZEMIESZCZEŃ PIONOWYCH	
A) $u_{y,\text{max}} = 0,62 \text{ mm}$ $u_{y,\text{min}} = -7,19 \text{ mm}$
B) $u_{y,\text{max}} = 0,88 \text{ mm}$ $u_{y,\text{min}} = -7,98 \text{ mm}$
MAPY PRZEMIESZCZEŃ POZIOMYCH	
A) $u_{x,\text{max}} = 1,84 \text{ mm}$ $u_{x,\text{min}} = -3,29 \text{ mm}$
B) $u_{x,\text{max}} = 2,45 \text{ mm}$ $u_{x,\text{min}} = -3,81 \text{ mm}$
MAPY NAPRĘŻEŃ PIONOWYCH	
A) $\sigma_{y,\text{max}} = 3,98 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_{y,\text{min}} = -107,17 \text{ kN/m}^2$
B) $\sigma_{y,\text{max}} = 6,45 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_{y,\text{min}} = -106,76 \text{ kN/m}^2$

W tym przypadku również postanowiono sprawdzić, jaka wartość modułu gruntu budującego nasyp będzie gwarantować jego stateczność. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń oszacowano, iż graniczna wartość modułu odkształcenia wynosi około 43 MPa.

Porównując wyznaczone w obu przypadkach minimalne wartości modułów odkształcenia gruntu, przy których nasyp staje się stateczny, można zauważyć, iż stosowanie gruntu mniej przepuszczalnego wymaga, by charakteryzował się on modułem odkształcenia o większych wartościach. Taka zależność wyznacza kierunek dalszych poszukiwań materiałów, z których będą budowane nasypy narażone na podtopienie. Stosowane materiały powinny być wystarczająco przepuszczalne dla wody, dostatecznie nośne i mało odkształcalne. Poszukiwania odpowiednich rozwiązań spełniających powyższe wymagania stanowi zatem szerokie pole do dalszych badań naukowych z zastosowaniem metod numerycznych.

Literatura

- [1] Dokumentacja geologiczno – projektowa linii kolejowej E30 Jaworzno Szczakowa – Trzebinia w km 27+800 linii 133
- [2] Glinicki P. S.: Geotechnika Budowlana, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1990 r.
- [3] Gryczmański M.: Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa 1995 r.
- [4] Instytut Techniki Budowlanej: Wymagania techniczne dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych, Instrukcje, Wytyczne, Poradniki nr 364-2007.
- [5] Madej J.: Metody sprawdzania stateczności zboczy, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 1981 r.
- [6] Ministerstwo Infrastruktury: Prognoza oddziaływania na środowisko projektu master planu dla transportu kolejowego w Polsce do 2030 roku, Warszawa, sierpień 2008 r.
- [7] Pisarczyk S.: Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004 r.
- [8] Rosikoń A.: „Budownictwo komunikacyjne na terenach objętych uszkodzeniami górnictwami”. Wyd. Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 1979 r.
- [9] Strycharz B. i in.: Funkcjonowanie nawierzchni drogowych w warunkach górniczych deformacji terenu. Materiały 52. Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Krynica 2006”, T.4, Gdańsk – Krynica, 2006 r.
- [10] Tamaka S.: Modelowanie numeryczne nasypu kolejowego zagrożonego podtopieniem. Materiały konferencji doktorantów „Wiedza i eksperymenty w budownictwie”, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2014 r.
- [11] Zydrón T.: Orientacyjne wartości współczynników filtracji. Materiały pochodzące ze strony internetowej Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie:
http://149.156.33.48/~tymzydr/wsp_k10.pdf (dostęp 28.02.2013 r.).

- [12] Załącznik do zarządzenia Nr 9/2009 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 4 maja 2009 r. - Warunki utrzymania podtorza kolejowego; Id-3, Warszawa 2009 r.
- [13] <http://www.gazetalubuska.pl/apps/pbcs.dll/article?AID=/20100809/POWIAT/181639558&template=artpicture§ioncat=artpicture> (dostęp 08.09.2012r.).

THE INFLUENCE OF PERMEABILITY OF SOIL ON THE STABILITY OF RAILWAY EMBANKMENT

Summary

Water, which appears in the area of the construction of the railway or road embankment has a significant impact on condition of structure, especially on its stability. The article presents a natural causes of water presence in the vicinity of soil structure. There is also explained presence of water caused by human activities. Author indicated the main causes of emergence the flood plain in areas of mining and presented key issues related to the design of soil structures. The main aim of the study was to analyze the numerical models of railway embankment in several different variants. Author used the computer program Z_Soil for investigation. There were carried out numerical analysis of railway embankment, which geometry and geotechnical parameters were consistent with project. The embankment is not stable, for this reason there was proposed the replacement the soil for better one. Numerical analysis confirmed that the embankment after exchanging soil is stable, but when there is an additional water load it stopped to be. Additionally, there was carried out numerical analysis of the embankments which are made of materials of different permeability (different permeability coefficient) has been carried. In both cases the embankment is not stable. Next, author performed the minimum values of module, which make the embankments stable. Based on the numerical analysis assessed the impact of soil permeability on the stability of the railway embankment. Embankments which are built with more permeable soil work better, existing vertical displacements and stresses are lower, the structures are more resistant to water load.

Keywords: permeability coefficient, numerical model, factor of safety, constitutive model, Young's modulus

DOI:10.7862/rb.2014.65

Przesłano do redakcji: lipiec 2014 r.

Przyjęto do druku: wrzesień 2014 r.