

ANALIZA WPŁYWU WARUNKÓW GEOTECHNICZNYCH PODTORZA NA STATECZNOŚĆ NASYPÓW KOLEJOWYCH W ASPEKTCIE KOLEI DUŻYCH PRĘDKOŚCI NA PODSTAWIE MODELOWANIA NUMERYCZNEGO¹

Elżbieta Pilecka

Dr hab. inż., prof. PK, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: epilecka@pk.edu.pl

Marta Zdanowicz-Dejnak

Mgr inż., doktorantka Politechniki Krakowskiej, e-mail: marta.zdanowicz@gmail.com

Streszczenie. Artykuł przedstawia przykład zastosowania metody modelowania numerycznego do celów monitorowania współczynnika stateczności przy różnych wartościach parametrów geotechnicznych podtorza kolejowego. Problem stateczności podtorza nabiera ważności w aspekcie projektowania zwiększania prędkości eksploatacyjnych polskich kolei. Przedstawiono rozwój kolei dużych prędkości na świecie i w Europie. W Polsce w pierwszej kolejności planuje się dostosować istniejącą linię CMK do wymagań kolei dużych prędkości. W artykule przedstawiono przykład obliczeń numerycznych na rzeczywistym przekroju geotechnicznym z linii kolejowej CMK. Do obliczeń wykorzystany został program FLAC/Slope 5.0, który jest modulem programu FLAC 5.0, przeznaczonym do obliczeń wskaźnika stateczności skarpy i zboczy.

Słowa kluczowe: stateczność nasypu kolejowego, koleje dużych prędkości, modelowanie numeryczne

1. Wprowadzenie

Historia kolei dużych prędkości rozpoczęła się wkrótce po II wojnie światowej, w latach 50. w Japonii. Pierwszą w pełni funkcjonalną linią oddaną do użytku 1 października 1959 r. była linia The New Tokaido łącząca Tokio z Osaką. Na linii o łącznej długości 515 km pociągi poruszały się z prędkością do 210 km/h. Była pierwszą linią nowej sieci kolejowej Shinkansen, o normalnej – szerszej niż japońska standardowa – szerokości toru. Sieć ta była i jest aż do dziś regularnie rozbudowywana. Maksymalne prędkości na tej trasie również rosły stopniowo, osiągając obecnie wartości nawet do 300 km/h.

Początki kolei dużych prędkości w Europie to rok 1967. Pierwszym krajem, który zdecydował się na dostosowanie linii do wysokich prędkości była Francja. W maju 1967 r. uruchomiła ona jadący z prędkością 200 km/h ekspres „Capitole” z Paryża do Tuluzy. Szybko jednak okazało się, że możliwości istniejących linii są

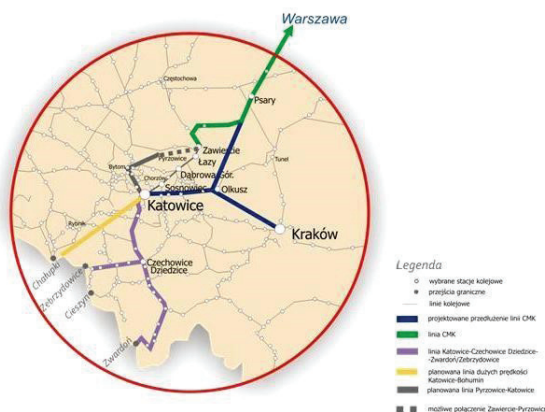
¹ Wkład procentowy poszczególnych autorów: Pilecka E. 90%, Zdanowicz-Dejnak M. 10%

mocno ograniczone i niezbędnym jest zbudowanie całkowicie nowych połączeń. Pierwszym z nich była oddana do użytku we wrześniu 1981 r. trasa z Paryża do Lyonu, na której ostateczna prędkość pociągów wyniosła 270 km/h. Stanowiła ona początek francuskiej sieci kolei dużych prędkości, obejmującej cały kraj, nazywanej - od kursujących na niej pociągów - TGV, która podobnie jak w przypadku Japonii rozbudowywana jest po dzień dzisiejszy.

Za przykładem Francji poszły również inne europejskie państwa. Włochy z linią Direttissima, oddawaną stopniowo w przeciągu lat 1976-1992, przystosowaną dla prędkości do 250 km/h. Wielka Brytania, która jakkolwiek pociągi jeżdżące ok. 200 km/h wprowadziła jako jeden z pierwszych krajów już w 1976 r., to w latach późniejszych skupiła się jednak raczej na modernizacji linii istniejących, niż na budowie nowych, przystosowanych do wyższych prędkości. Niemcy pierwszą linię (Monachium – Augsburg) zmodernizowały do 200 km/h w 1977 r., a już w roku 1985 w Niemczech istniało 440 km linii, na których pociągi osiągały prędkość 200 km/h. Hiszpania oddała do użytku w kwietniu 1992 r. pierwszą linię sieci AVE łączącą Madryt z Sewillą, na której pociągi osiągnęły 300 km/h (pierwotnie 250 km/h).

Również inne kraje z Europy i spoza niej, w mniejszym bądź większym stopniu, rozwinęły i rozwijają u siebie infrastrukturę kolei dużych prędkości. Koleje dużych prędkości są obecnie jedną z najintensywniej rozwijanych gałęzi światowej gospodarki. Polska chce do nich dołączyć między innymi przystosowując linię CMK do prędkości 250 km/h.

Celem modernizacji linii E65 Południe (CMK) jest ustanowienie połączenia kolejowego dużej prędkości pomiędzy Warszawą a Krakowem oraz Katowicami, z których zostanie doprowadzone następnie do granic Polski z Czechami i Słowacją (rys. 1). Centralna Magistrala Kolejowa była w założeniu budowana dla szybkich pociągów, z tego powodu możliwym jest doprowadzenie za pomocą zabiegów modernizacyjnych do uruchomienia na niej przewozów o prędkości powyżej 250 km/h.



Rys. 1. Modernizacja linii E65 {10}

Centralna Magistrala Kolejowa jest położona na gruntach o bardzo zróżnicowanej budowie geologicznej i o wysoko położonym zwierciadle wody gruntowej. Aby uzyskać dostateczną wytrzymałość podtorza należy przeanalizować stateczność nasypów kolejowych.

W przypadku budownictwa komunikacyjnego, czyli również budowy tras kolei wysokich prędkości, do podstawowych problemów stawianych przed inżynierami należy zapewnienie bezpieczeństwa konstrukcji w całym okresie jej wykonania oraz użytkowania, zarówno w aspekcie trwałości i niezawodności budowli, traktowanej jako całość, jak i spełnienia wymogów eksploatacyjnych, jakie są przed nią stawiane. W aspekcie geotechnicznym budownictwa infrastrukturalnego niewątpliwie najważniejsza jest prawidłowa ocena stateczności budowli ziemnych (nasypów oraz wykopów), stanowiących nieodłączny element kolei wysokich prędkości oraz znajomość sposobów jej zapewnienia.

2. Analiza stateczności przykładowego nasypu kolejowego na linii CMK

Najważniejszym warunkiem, determinującym zachowanie stateczności przez projektowany nasyp, jest zachowanie odpowiedniego współczynnika pewności F . W praktyce jest on określany przez stosunek wartości oddziaływań na (w tym przypadku) nawierzchnię torowiska, do wartości oporu gruntu przed utratą stateczności. Według „Warunków technicznych utrzymania podtorza kolejowego Id-3” (Instrukcja ID-3, 2009) współczynniki pewności F (określone na podstawie właściwości gruntów) powinny wynosić, co najmniej:

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

W przypadku oceny stanu podtorza istniejącego należy przyjmować, że współczynniki pewności F wynoszą:

- 1,0 – jeśli występują oznaki ruchu osuwiskowego,
- 0,95 gdy zachodzi ruch osuwiskowy lub nastąpiło już obsunięcie.

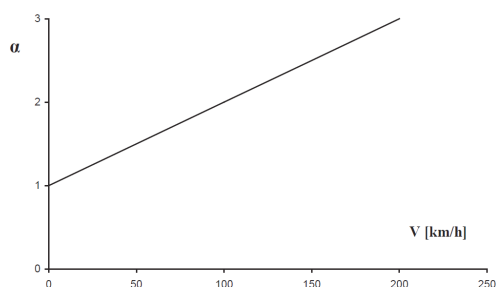
Jak podają Batog i Hawrysz [1] na potrzeby analizy stateczności podtorza można przyjąć obciążenie będące sumą dwóch rodzajów oddziaływań: statycznego i dynamicznego, wyznaczone w sposób podany w normie BN-88/8932-02:1988 [2] oraz zalecany w literaturze [1, 3, 5] i przedstawiony poniżej.

Wartość obciążenia wyznaczana jest ze wzoru [2]:

$$\sigma_{zd,max} = \alpha \sigma_0 \beta \frac{v^2}{g^2 + m z_1^2} + \sigma_{zn} \quad (1)$$

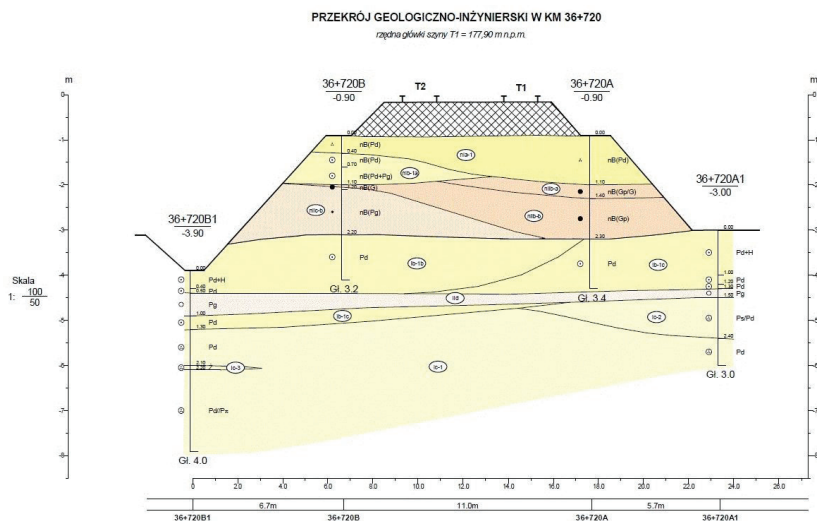
gdzie:

- wariant 1: $\alpha = 2$ – dla $v = 100$ km/h,
- wariant 2: $\alpha = 2,6$ – dla $v = 160$ km/h (na podstawie pracy [1]).



Rys. 2. Wykres zależności współczynnika dynamicznego od prędkości pociągu {1}

Jak można zauważyć z wykresu na rysunku 2, wartość współczynnika odpowiadającego za obciążenia dynamiczne wzrasta wprost proporcjonalnie do prędkości pociągu. W związku z tym należy spodziewać się zwiększonych obciążeń dla kolei dużych prędkości i dlatego ważną sprawą są badania wpływu warunków geotechnicznych podtorzy kolejowych na współczynnik stateczności nasypów kolejowych. Odpowiednim narzędziem do badania wpływu warunków geotechnicznych na współczynnik stateczności (pewności) jest modelowanie numeryczne. Modele utworzone na rzeczywistych danych geotechnicznych pozwalają w teoretyczny sposób obserwować zmiany współczynnika stateczności przy zwiększających się obciążeniach linii kolejowej. W przypadku niespełnienia kryterium stateczności modelowanie pozwala na opracowanie odpowiedniego wzmocnienia podłoża linii kolejowej. W artykule przedstawiono przykład obliczeń numerycznych na rzeczywistym przekroju geotechnicznym z linii kolejowej CMK przeznaczonej do modernizacji w celu podwyższenia prędkości eksploatacyjnych. Do obliczeń wykorzystany został program FLACSlope 5.0, który jest modułem programu FLAC 5.0, przeznaczonym do obliczeń wskaźnika stateczności skarp i zbczy. Do obliczeń wybrano przykładowy przekrój geotechniczny (rys. 3).



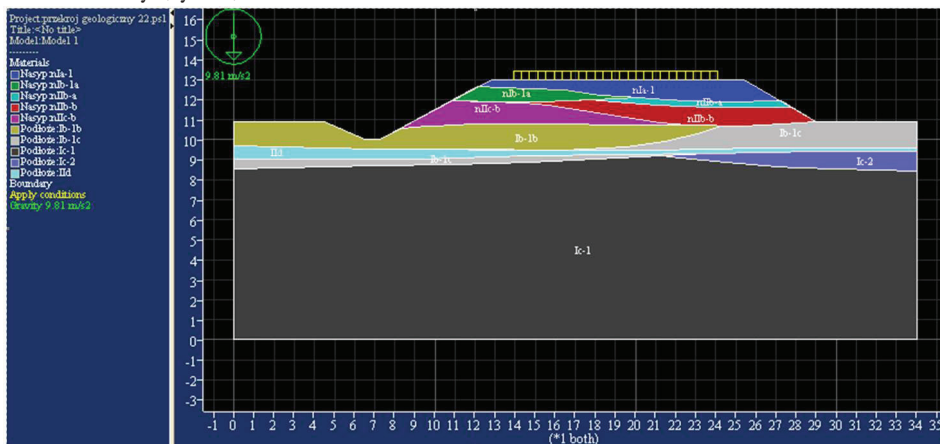
Rys. 3. Przykładowy przekrój geotechniczny przez linię kolejową CMK {4}

Każda warstwa geotechniczna ma określone charakterystyczne parametry geotechniczne (tab. 1). Wartości charakterystycznych parametrów geotechnicznych poszczególnych warstw geotechnicznych tworzących analizowane modele, zostały przyjęte na podstawie dokumentacji geotechnicznych linii kolejowej E65 [4]. Obliczenia przeprowadzono wykorzystując wartości charakterystyczne obciążeń oraz parametrów geotechnicznych ośrodka, zgodnie z zasadami podanymi w normie PN-B-03010 [6], za miarodajną wartość współczynnika stateczności przyjęto $F_{dop} = 1,5$, zgodnie z warunkami technicznymi Id-3 [9] dla podtorza w eksploatacji. Przyjęta została jednakowa konstrukcja nawierzchni charakterystyczna dla prostego odcinka szlakowego, dwutorowej linii kolejowej, zaliczanej do linii magistralnych, na której pociągi pasażerskie mogą jeździć z prędkością $v_{max} \leq 160$ km/h zgodnie z informacjami zawartymi w rozporządzeniu [7], warunkami technicznymi Id-3 [9] i Id-1 [8]. Podstawowe wymiary nawierzchni oraz torowiska zostały przyjęte na podstawie dokumentacji geotechnicznej.

Tabela 1. Parametry warstw geotechnicznych

Warstwa geotechniczna*	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]**$	φ_u [°]	c_u [kPa]
nIa-1	1600	29,50	-
nIb-1a	1650 (1750)	29,90	-
nIIb-a	2050	10,20	8,80
nIIb-b	2050	12,10	11,40
nIIc-b	2150	15,90	20,30
Ib-1b	1650 (1900)	30,50	-
Ib-1c	1650 (1900)	31,00	-
Ic-1	1700 (2000)	31,60	-
Ic-2	1800(2050)	34,50	-
IId	2200	18,00	30,00

Dla podanych powyżej warstw geotechnicznych został skonstruowany model obliczeniowy (rys. 4).



Rys. 4. Obliczeniowy model dla przykładowego przekroju przez CMK

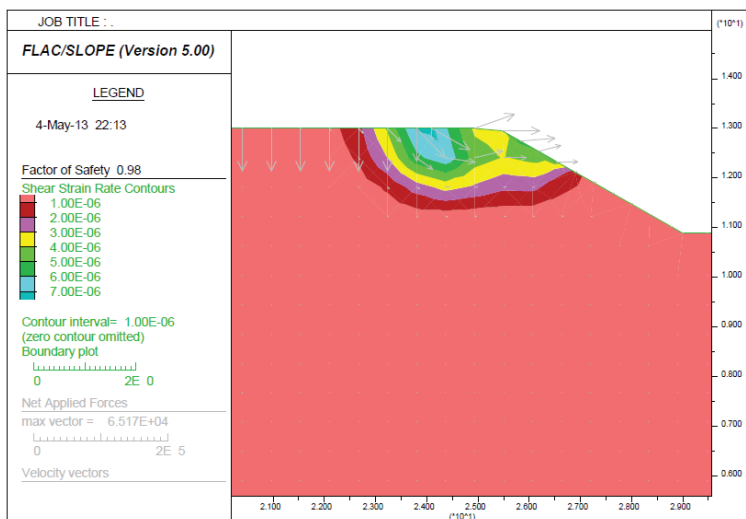
Dla powyższego modelu przeanalizowane zostały dwa warianty obciążenia:

- wariant 1 – obciążenie taborem poruszającym się z prędkością $v = 100 \text{ km/h}$,
- wariant 2 – obciążenie taborem poruszającym się z prędkością $v = 160 \text{ km/h}$.

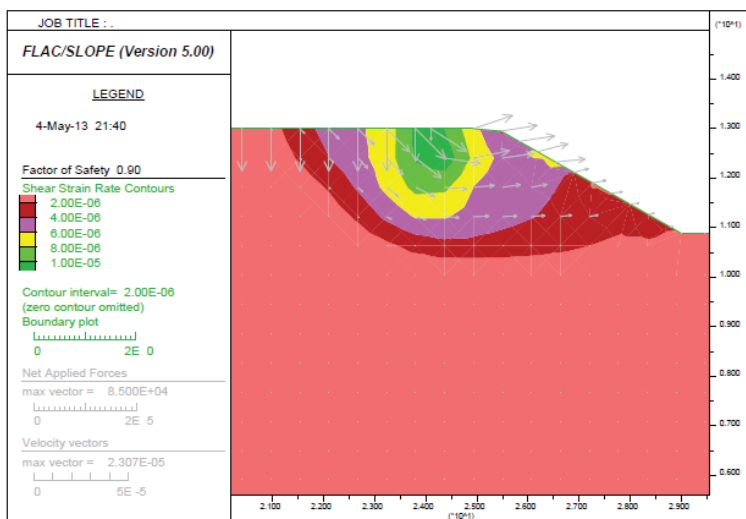
Na obciążenie podtorza w poziomie torowiska składają się:

- ciężar własny nawierzchni kolejowej,
- obciążenie taborem.

Obciążenia obliczone zostały według wzoru (1) podanego powyżej. Rezultaty obliczeń dla prawej skarpy nasypu podano na rysunkach 5 i 6 dla dwóch wariantów prędkości pociągów 100 km/godz. i 160 km/godz.



Rys. 5. Wynik obliczeń numerycznych stateczności nasypu kolejowego na linii CMK dla prędkości pociągu 100 km/godz., $F = 0,98$



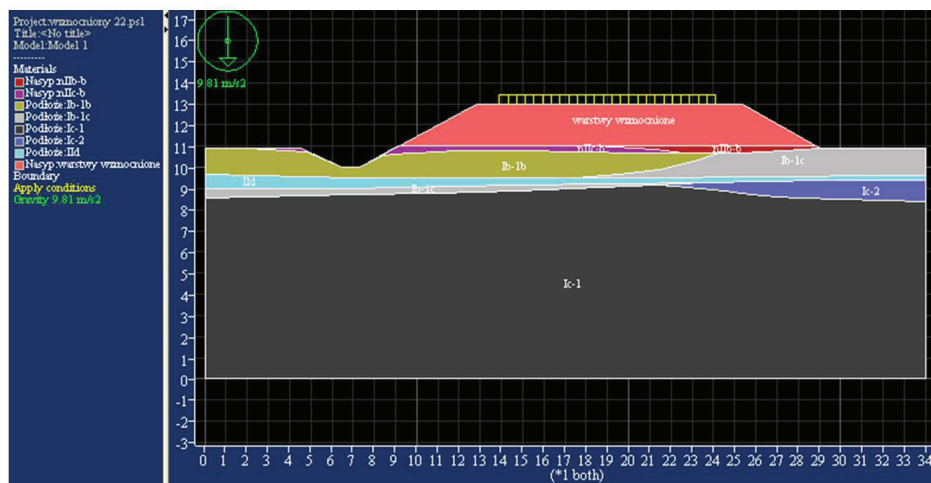
Rys. 6. Wynik obliczeń numerycznych stateczności nasypu kolejowego na linii CMK dla prędkości pociągu 160 km/godz., $F = 0,90$

W celu poprawy współczynnika stateczności wzmocniono nasyp poprzez wymianę gruntu najwyższych warstw. Parametry poszczególnych warstw przedstawiono w tabeli 2.

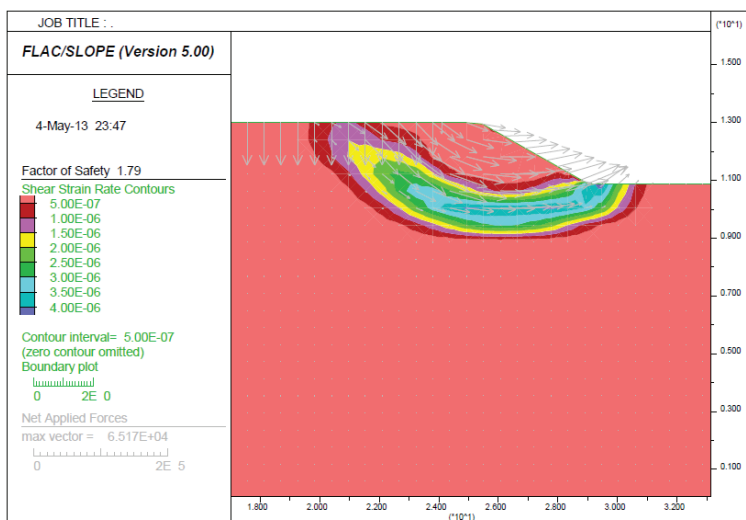
Tabela 2. Parametry warstw geotechnicznych

Warstwa geotechniczna*	$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]**$	φ_u [°]	c_u [kPa]
warstwy ulepszone	2150	31,50	73,20
nIIb-b	2050	12,10	11,40
nIIc-b	2150	15,90	20,30
Ib-1b	1650 (1900)	30,50	-
Ib-1c	1650 (1900)	31,00	-
Ic-1	1700 (2000)	31,60	-
Ic-2	1800(2050)	34,50	-
IIId	2200	18,00	30,00

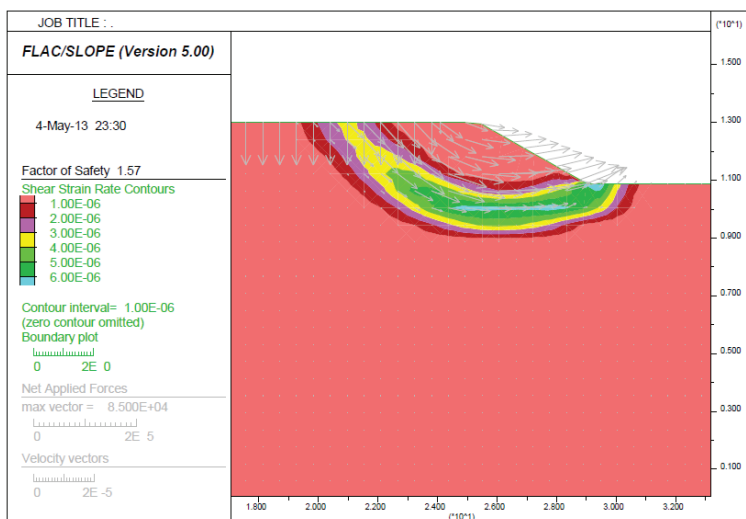
Utworzono model obliczeniowy przedstawiony na rys. 7. Na podstawie tego modelu ponownie przeprowadzono analizę numeryczną.



Rys. 7. Model obliczeniowy z warstwą wzmocnioną



Rys. 8. Wynik obliczeń numerycznych stateczności nasypu kolejowego z warstwą wzmocnioną na linii CMK dla prędkości pociągu 100 km/godz., $F = 1,79$



Rys. 9. Wynik obliczeń numerycznych stateczności nasypu kolejowego z warstwą wzmocnioną na linii CMK dla prędkości pociągu 160 km/godz. $F = 1,57$

Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń numerycznych, warunki geotechniczne podtorza kolejowego mają duży wpływ na stateczność podtorza kolejowego. Model obliczeniowy wykonany na rzeczywistym przekroju geotechnicznym (rys. 5 i 6) wykazał niedostateczny współczynnik bezpieczeństwa $F = 0,97$ i $F = 0,90$. Wyniki modelu ze wzmocnioną warstwą nasypu (rys. 8 i 9) wykazują natomiast współczynnik bezpieczeństwa $F = 1,79$ i $F = 1,57$ zgodny z obowiązującymi zaleceniami projektowymi. Jednak można zauważyć, że w wyniku utworzenia war-

stwy wzmocnionej obciążenia powodują przenoszenie naprężeń na podłoże nasypu i w wyniku tego tworzy się głębsza powierzchnia poślizgu. Analizy te prowadzą do wniosku, że samo uzyskanie odpowiedniego współczynnika bezpieczeństwa może nie wystarczać dla zachowania bezpiecznych warunków eksploatacji linii kolejowej. Modelowanie numeryczne dostarcza nam nowych informacji, które mogą służyć analizom prowadzącym do wizualizacji wpływu warunków geotechnicznych na stateczność nasypów kolejowych. Jest to szczególnie ważne zadanie w przypadku projektowania kolei dużych prędkości w Polsce.

3. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy stateczności nasypów kolejowych, które stanowiły część drogi kolejowej E65 (CMK), opierając się na dokumentacji geotechnicznej do celów modernizacji tejże linii [4] wynika, że nasypy nie spełniają warunku stateczności przy zwiększonych obciążeniach dla kolei dużych prędkości. Warunki geotechniczne podtorza są zasadniczą przyczyną niestabilności nasypów kolejowych. Można poprawić ten stan stosując metody wzmacniania podtorzy kolejowych. Zastosowanie metody modelowania numerycznego pozwala na monitorowanie współczynnika stateczności przy różnych wartościach parametrów geotechnicznych podtorza kolejowego. Takie badania różnych rozwiązań pozwolą na lepsze rozpoznanie zagrożenia dla stateczności nasypów kolejowych obciążonych składami przejeżdżającymi z dużymi prędkościami. To z kolei pozwoli na podjęcie odpowiednich działań mających na celu zabezpieczenie budowli na etapie projektowania lub eksploatacji.

Bibliografia

- [1] Batog A., Hawrysz M., Wybrane problemy geotechniczne budowy i modernizacji nasypów oraz podtorza kolejowego, *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 4/2012, s.8-12.
- [2] BN-88/8932-02:1988 Podtorze i podłoże kolejowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- [3] Bzówka J., Juzwa A., Knapik K., Stelmach K., *Geotechnika komunikacyjna*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [4] Geopartner Sp. z o. o., Dokumentacja geotechniczna do celów projektowych dla przygotowania modernizacji linii kolejowej E65 (tor 1 i 2) na odcinku linii Nr 4 (CMK) ze stacjami, 2008, (fragmenty).
- [5] Głazewski M., Nowocien E., Piechowicz K., *Roboty ziemne i rekultywacyjne w budownictwie komunikacyjnym*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010, s. 184-277.

-
- [6] PN-B-03010:1983 Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
 - [7] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998r., w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie (Dz. U. nr 151, poz. 987).
 - [8] Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1, Załącznik do zarządzenia nr 14/2005 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 18 maja 2005r.
 - [9] Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3, Załącznik do Zarządzenia nr 9/2009 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 4 maja 2009r.
 - [10] www.plk-sa.pl, 18.12.2012.