

Andrzej Batog, Maciej Hawrysz**

PROBLEMY ANALIZY STATECZNOŚCI SKARP NASYPÓW KOLEJOWYCH

1. Wstęp

Modernizacja istniejących kolejowych linii magistralnych wymaga sprawdzania stateczności nasypów ziemnych z uwagi na zwiększenie obciążeń eksploatacyjnych, konieczność poszerzenia torowiska i niejednokrotnie potrzebę wzmocnienia w miejscach wcześniej występujących dysfunkcji. Aktualnie obowiązujące przepisy w zakresie projektowania nasypów kolejowych poniżej konstrukcyjnych warstw podtorza nie są dostosowane do wysokich prędkości rozkładowych rzędu 160 km/h i większych. Brak również krajowych doświadczeń w zapewnieniu bezpieczeństwa eksploatacji linii kolejowych przy dużych prędkościach rozkładowych.

W artykule przedstawiono propozycję procedury analizy stateczności skarp nasypów kolejowych podlegających takim obciążeniom.

2. Analiza stateczności nasypów kolejowych w świetle aktualnych przepisów

Podstawowe unormowania dotyczące warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie, zawiera rozporządzenie MTiGM nr 987 z 1998 r. [1]. W zakresie analizy stateczności w rozporządzeniu znajduje się jedynie ogólnikowy zapis, iż „skarpy podtorza powinny mieć pochylenie zapewniające ich stateczność w oparciu o przeprowadzoną analizę stateczności”. Brak jest natomiast szczegółowych uregulowań dotyczących wyboru metody analizy stateczności jak i wymaganych zapasów stateczności (bezpieczeństwa) skarp nasypów, brak również odniesień dotyczących skarp przekopów, w których prowadzone są odcinki szlaków kolejowych. Ponadto w rozporządzeniu tym występuje istotna sprzeczność z przywołanym wyżej zapisem, gdyż na rysunkach przekrojów poprzecznych torów (rys. 3.2. a–e) przy skarpach nasypów podano pochylenie 1:1,5, co

* Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Politechnika Wrocławska, Wrocław

niekoniecznie może pozostawać w zgodzie z wynikami przeprowadzonej analizy stateczności.

Niewiele więcej szczegółowych wskazówek odnośnie wymiarowania skarp nasypów zawiera akt niższego rzędu, którym są aktualnie obowiązujące wytyczne Id-3 (D-4), dotyczące warunków technicznych utrzymania podtorza kolejowego, wprowadzone w Zarządzeniu nr 30 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe SA z dnia 5 października 2005 roku [2]. Wytyczne te zawierają m.in. wskazówki dotyczące doboru rodzaju gruntowego materiału konstrukcyjnego oraz nachyleń skarp nasypów. W §4 „Kształtowanie przekroju poprzecznego podtorza” w tablicy 1 „Typowe pochylenia skarp podtorza” dla nasypów formowanych z gruntów przydatnych bez zastrzeżeń do budowy nasypów zalecane jest nachylenie skarp 1:1,5. Według tychże wytycznych (§5, tablica 2) za grunty przydatne bez zastrzeżeń są uważane żwiry i pospółki, również gliniaste, które stanowią jeden z najczęściej używanych materiałów do budowy dolnych i górnych warstw nasypów.

Należy tu zauważyć, iż taki sposób kształtowania skarp nasypu kolejowego poniżej warstw konstrukcyjnych podtorza w zasadzie nie odbiega od praktyki stosowanej w Polsce przed II wojną światową, kiedy prędkości rozkładowe na niemal 90% długości linii kolejowych nie przekraczały 100 km/h. W praktyce projektowej kolejnictwa przyjmuje się nachylenie skarp 1:1,5 jako typowe, niezależnie od parametrów eksploatacyjnych, począwszy od linii znaczenia miejscowego aż po linie magistralne, zapominając o tym, że było ono ustalone dla niższych prędkości i obciążeń niż obowiązujące obecnie na liniach kategorii „0”.

Wytyczne Id-3 (D-4) [2] nie zawierają jakichkolwiek bezpośrednich odniesień dotyczących wymaganych zapasów stateczności (bezpieczeństwa). W praktyce projektowej często przyjmowany jest taki sam zapas stateczności, jak dla skarp nasypów drogowych, dla których wymagania zawarto w rozporządzeniu MTiGM w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie [3]. Zgodnie z załącznikiem 4 tego rozporządzenia wartości dopuszczalnych wskaźników stateczności nie powinny być mniejsze niż 1,5. Ponadto wykorzystywana jest instrukcja Instytutu Techniki Budowlanej nr 424 [4], według której za bezpieczne wartości wskaźnika stateczności (wskaźnika stanu równowagi) przy wartościach charakterystycznych parametrów geotechnicznych i obciążeń należy przyjmować wskaźnik F o wartości nie mniejszej niż 1,3.

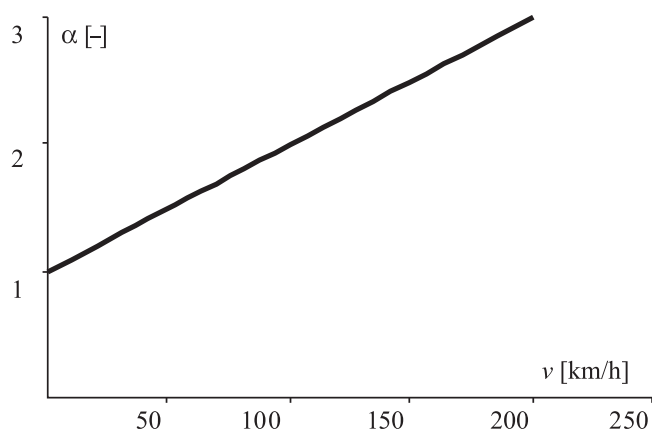
Na koniec należy dodać, iż ogólne zasady projektowania geotechnicznego w zakresie stateczności skarp nasypów zawiera Eurokod 7, który decyzją PKN ma status Polskiej Normy [5], choć nie został dotychczas przetłumaczony na język polski. W praktyce inżynierskiej zastosowanie Eurokodu 7 jest jednak problematyczne, gdyż nie został jeszcze opracowany „Załącznik krajowy” (*National Annex*), który by precyzował, które z trzech proponowanych podejść obliczeniowych (*Design Approaches*) oraz zestawów współczynników cząstkowych mają być stosowane w Polsce.

3. Sposób ustalenia wielkości obciążenia podtorza

Wśród czynników mających wpływ na stateczność nasypów kolejowych jednym z najważniejszych jest obciążenie przejeżdżającym składem kolejowym. Prócz obciążenia sta-

tycznego ciężarem składu należy również uwzględnić efekty dynamiczne, których wielkość rośnie ze wzrostem prędkości rozkładowej. W literaturze przedmiotowej podane są zalecenia dotyczące sposobu przyjmowania współczynnika dynamicznego dla maksymalnej prędkości rozkładowej wynoszącej 110÷120 km/h [6], brak natomiast bezpośrednich wytycznych dla wyższych prędkości rozkładowych. W związku z tym w praktyce projektowej dla modernizowanych linii o planowanej prędkości rozkładowej 160 km/h przyjmowane są, na podstawie różnych przesłanek, rozbieżne wartości obciążenia pseudostatycznego od 90 do 180 kPa i sporadycznie wyższe.

Porównując ze sobą kilka najczęściej stosowanych sposobów obliczania obciążeń działających na torowisko stwierdzono [7], że za najbardziej miarodajną można uznać procedurę podaną w załączniku 1 do normy BN-88/8932-02 [8]. Załącznik ten dotyczy obliczania osiadania podtorza, co również jest niezwykle istotne przy projektowaniu modernizacji podtorza, ale w punkcie 1 podaje sposób obliczania naprężeń działających na torowisko.



Rys. 1. Zależność współczynnika dynamicznego α od prędkości v pojazdu szynowego

Pionowe naprężenia oddziaływujące na torowisko oblicza się ze wzoru:

$$\sigma_{zd \max} = \alpha \sigma_0 \beta \frac{s^2}{s^2 + mz_1^2} + \sigma_{zn}, \quad (1)$$

gdzie:

α — współczynnik dynamiczny, przyjmujący wartości:

— dla prędkości $v < 100$ km/h, $\alpha = 1,2 \div 2,0$,

— dla prędkości $v > 100$ km/h, $\alpha = 2,0 \div 3,0$;

ponieważ dla prędkości $v = 0$ współczynnik $\alpha_{\min} = 1,0$ a dla prędkości $v = 100$ km/h wynosi on $\alpha = 2,0$, to przy zależności liniowej $\alpha = f(v)$ i prędko-

kości 160 km/h należy przyjąć $\alpha = 2,6$. Zależność $\alpha = f(v)$ nie jest wprawdzie liniowa (rys. 1), ale w zakresie prędkości do 160 km/h z niewielkim, pomijalnym błędem można przyjmować ją jako liniową. Wobec tego dla prędkości $v = 160$ km/h, $\alpha = 2,6$;

- σ_0 — naprężenie w podsypce na poziomie spodu podkładów obliczone ze wzoru $\sigma_0 = P/F$ kPa, w którym P oznacza obciążenie pionowe przekazywane na podkład o powierzchni podstawy F ;
- β — współczynnik określający stosunek siły przekazywanej przez podkład na podsypkę do siły przekazywanej przez koło pojazdu na szynę. Oblicza się go ze wzoru:

$$\beta = \frac{a}{2^4 \sqrt{\frac{4EJ}{U}}} \quad (2)$$

w którym:

- a — odległość między osiami sąsiednich podkładów, m,
 E — moduł sprężystości liniowej stali szynowej, MPa,
 J — moment bezwładności przekroju poprzecznego szyny względem poziomej osi przechodzącej przez środek ciężkości przekroju, m⁴,
 U — współczynnik podłoża szyny, kPa,
 s — szerokość podstawy podkładu, m,
 z_1 — odległość od spodu podkładu do torowiska, m,
 m — współczynnik charakteryzujący rozkład naprężeń w podsypce, przyjęto $m = 0,5$,
 σ_{zn} — naprężenie na powierzchni podtorza wywoływane ciężarem nawierzchni, kPa.

Do obliczania naprężeń w podtorzu i podłożu przyjmuje się obciążenie ciągle $\sigma_{zd \max}$ o szerokości styku podsypki z podtorzem B [m] i nieograniczonej długości L .

Przyjmując dla warunków modernizowanej linii $v = 160$ km/h i $P = 221$ kN (obciążenie na oś), zgodnie z [7] oraz instrukcją Id-1 [9] można wyznaczyć pionowe naprężenia oddziaływujące na torowisko. Pozostałe dane przyjęto jak dla typowej konstrukcji toru, to znaczy:

$$a = 0,6 \text{ m}; E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}; U = 80 \text{ MPa}; s = 0,30 \text{ m}; z_1 = 0,35 \text{ m},$$

$$m = 0,5; \sigma_{zn} = 10 \text{ kPa}; F = 0,65 \text{ m}^2; J = 3055 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 \text{ dla szyny UIC60.}$$

Dla takich danych otrzymano:

$$\sigma_0 = 280 \text{ kPa}; \beta = 0,321 \text{ i } \sigma_{zd \max} = 149 \text{ kPa.}$$

Zatem dla modernizowanych linii kolejowych dla prędkości rozkładowych 160 km/h wielkość obciążenia zastępczego wynosi $q_{zast} = 150$ kPa. Jest ono niemal dwukrotnie wyższe niż przed modernizacją linii, gdy wynosiło 80 kPa.

Dla tak dużej wartości obciążenia krótkotrwałego nasypu przyjęcie jako kryterium do projektowania skarp dopuszczalnej wartości wskaźnika stateczności $F = 1,5$ powodować będzie bardzo duże zwiększenie wymiarów nasypów bądź konieczność dobudowania ław dociążających (przypór) o bardzo znacznej szerokości. Wynika to z faktu, iż grunty niespoiste, najczęściej wykorzystywane do tego celu, mają stosunkowo ograniczoną możliwość mobilizowania dodatkowych sił utrzymujących (oporu na ścinanie). Z tego względu należy dostosować procedury projektowania nasypów kolejowych do specyfiki ich obciążenia.

4. Propozycja procedury analizy stateczności nasypów kolejowych z uwzględnieniem specyfiki ich obciążenia

Sposób oceny stateczności skarp nasypów i przekopów kolejowych winien uwzględniać, prócz specyfiki obciążenia, również rodzaj metody obliczeniowej, stopień rozpoznania rodzaju i stanu gruntów. Tak precyzyjne zapisy dotyczące podejścia projektowego w zakresie stateczności nasypów ziemnych zastosowano dotychczas w rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie [10].

Analiza stateczności skarp gruntowych polega ogólnie na wykazaniu, iż spełniona jest zależność:

$$\gamma_p E_{dest}^{ch} \leq E_{stab}^{ch} \quad (3)$$

gdzie:

$$E_{stab}^{ch}, E_{dest}^{ch} \text{ — charakterystyczne oddziaływania stabilizujące i destabilizujące,}$$

$$\gamma_p \text{ — współczynnik pewności.}$$

Zatem minimalne wartości wskaźników stateczności F_{min} winny spełniać warunek:

$$F_{min} = \frac{E_{stab}^{ch}}{E_{dest}^{ch}} \geq \gamma_p \quad (4)$$

Wartości współczynników pewności należy dobrać z uwzględnieniem układu obciążenia, prędkości przejazdu, sposobu określenia współczynnika dynamicznego, stopnia rozpoznania budowy korpusu nasypu i jego bezpośredniego podłoża oraz metody analizy stateczności.

Postuluje się wyszczególnienie trzech układów obciążenia:

- podstawowy, nasyp nieobciążony składem,
- wyjątkowy statyczny, nasyp obciążony ciężarem statycznym składu (jest to ciężar pojazdu szynowego stojącego na nasypie bądź przejeżdżającego z niewielką prędkością),
- wyjątkowy dynamiczny, nasyp obciążony składem przejeżdżającym z pełną prędkością rozkładową.

Obliczenia stateczności skarp nasypów kolejowych są wykonywane za pomocą programów komputerowych wykorzystujących różne metody obliczeniowe. Można je podzielić na:

- dokładne, obejmujące metodę elementów skończonych (technika redukcji stanu naprężenia lub parametrów wytrzymałości) oraz metody równowagi granicznej (pasków) dla dowolnych powierzchni poślizgu (np. Morgensterna-Price'a, Spencera),
- uproszczone — metody równowagi granicznej dla kołowych powierzchni poślizgu (Felleniusa, Bishopa). Należy tu podkreślić, iż metoda Felleniusa (szwedzka) na mocy twierdzeń teorii nośności granicznej daje najniższą (najbezpieczniejszą) wartość oceny wskaźnika stateczności.

Oddziaływania dynamiczne przejeżdżającego składu mogą być uwzględniane w sposób:

- bezpośredni, np. w wyniku uwzględnienia dodatkowych sił bezwładności, o wielkości ustalonej na podstawie pomierzonych przyspieszeń wywołanych analizowanymi obciążeniami,
- pośredni — pseudostatyczny, opisany w punkcie 3, przy czym do obliczeń można przyjąć wartość naprężenia $\sigma_o = 280$ kPa dla składu pociągów towarowych i wartość $\sigma_o = 180$ kPa dla składu pociągów osobowych, co wynika z uwzględnienia w tym obciążeniu tylko nacisku na oś wagonami osobowymi o wielkości $P = 140$ kN.

Biorąc pod uwagę powyższe klasyfikacje, postuluje się wprowadzenie do obliczeń następujących wymaganych wartości współczynnika pewności dla metod dokładnych analizy stateczności:

- podstawowy układ obciążenia $\gamma_p = 1,5$,
- wyjątkowy statyczny układ obciążenia $\gamma_p = 1,3$.

Dla metod uproszczonych analizy stateczności (dających niższą ocenę wskaźników stateczności):

- podstawowy układ obciążenia $\gamma_p = 1,3$,
- wyjątkowy statyczny układ obciążenia $\gamma_p = 1,2$.

Dla układu obciążenia wyjątkowego dynamicznego przy zastosowaniu metod dokładnych analizy stateczności i bezpośredniego sposobu wyznaczenia wielkości oddziaływań dynamicznych $\gamma_p = 1,25$.

Dla układu obciążenia wyjątkowego dynamicznego przy zastosowaniu metod uproszczonych analizy stateczności i pośredniego sposobu wyznaczenia wielkości oddziaływań

dynamicznych $\gamma_p = 1,15$. Tak niski zapas stateczności jest akceptowalny, gdyż z jednej strony metody uproszczone dają najniższe (najbezpieczniejsze) oceny stateczności, a z drugiej pośredni (pseudostatyczny) sposób uwzględnienia efektów dynamicznych zakłada jednako- we ich oddziaływanie na warstwy nasypu leżące bezpośrednio pod podtorzem i na zalega- jące głębiej. W zależności od rodzaju gruntu, jego wilgotności, zapewne dochodzi do tłumienia części oddziaływań dynamicznych w głębszych warstwach nasypu bądź jego bezpo- średniego podłoża.

Podane wartości współczynników pewności dla wyjątkowego dynamicznego układu obciążenia mogą być stosowane tylko w przypadku dobrego rozpoznania układu i rodzaju gruntów dla nowych nasypów i nasypów modernizowanych, które wykonywane są z zasto- sowaniem kontroli jakości robót ziemnych (np. sprawowanej przez nadzór geotechniczny).

Analiza stateczności powinna być prowadzona dla wyszczególnionych powyżej przy- padków przy przyjęciu wartości charakterystycznych parametrów geotechnicznych wydzie- lonych warstw w nasypie lub przekopie i ich bezpośrednim podłożu oraz wartości charakte- rystycznych obciążeń zewnętrznych.

5. Podsumowanie

Przedstawione propozycje procedury analizy stateczności skarp nasypów mają charak- ter materiału do dyskusji w środowisku geotechników. Oparte są na aktualnie obowiązują- cej grupie przepisów, dotyczących innych typów budowli ziemnych, oraz wynikają z prak- tycznych doświadczeń autorów.

Podkreśla się brak krajowych wytycznych do projektowania nasypów dla dużych prędkości rozkładowych, gdzie znaczący czynnik destabilizacyjny stanowią oddziaływania dynamiczne. Jednostki naukowe we współdziałaniu z jednostkami badawczymi kolejnictwa winny przeprowadzić kompleksowe badania modelowe i symulacje numeryczne w celu opracowania metod wymiarowania nasypów obciążonych składami o tradycyjnej i uchyłnej konstrukcji przejeżdżających z dużymi prędkościami rozkładowymi (120 km/h i powyżej). Postulat ten wynika z rzeczywistego braku krajowych doświadczeń w zapewnieniu biepie- czeństwa eksploatacji linii kolejowych przy dużych prędkościach rozkładowych.

Specyfika projektowania nasypów kolejowych powinna być uwzględniona w zapisach Załącznika krajowego” (*National Annex*) do Eurokodu 7 [5].

W wyniku zastosowania przedstawionych kryteriów w odniesieniu do nasypów kole- jowych, w szczególności wyodrębniając trzy układy obciążenia, można zoptymalizować wy- miarowanie nasypów oraz zakres prac modernizacyjnych przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa eksploatacji szlaków kolejowych.

LITERATURA

- [1] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej nr 987 z dnia 10.09.1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie. Dz.U. Nr 151 z dnia 15.12.1998 r.
- [2] Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3 (D-4), PKP Polskie Linie Kolejowe SA, War- szawa, 2004

- [3] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej nr 430 z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. nr 43 z dnia 14 maja 1999 r.)
- [4] Instrukcja ITB nr 424/2006. Ocena stateczności skarp i zboczy. Warszawa, 2006
- [5] PN-EN 1997-1:2005 (U) Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne
- [6] Drogi Kolejowe, praca zbiorowa pod redakcją Jana Sysaka, Warszawa, PWN 1986
- [7] *Krużyński M., Hawrysz M., Batog A.*: Stateczność skarp nasypów modernizowanych linii magistralnych, [w:] Problemy modernizacji i naprawy podtorza kolejowego. Wrocław – Żmigród, 2006
- [8] Norma branżowa „Podtorze i podłoże kolejowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania” BN-88/8932-02 z roku 1988
- [9] Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1 (D-1), PKP Polskie Linie Kolejowe SA, Warszawa, 2005
- [10] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20.04.2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz.U. Nr 86 poz. 579)