



ALEKSANDRA DYJAS

Politechnika Śląska
alekdyj@gazeta.pl



JOANNA BZÓWKA

Politechnika Śląska
joanna.Bzowka@polsl.pl

Analizy numeryczne wzmocnienia podłoża gruntowego pod nasyp kolejowy kolumnami wykonywanymi techniką wglębnego mieszania

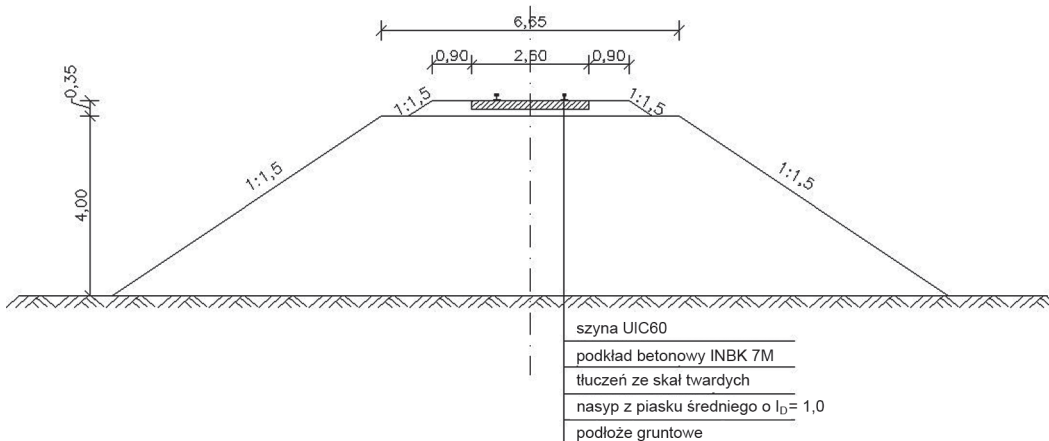
Na podstawie danych dotyczących podłoża gruntowego [1] oraz konstrukcji nawierzchni i podtorza kolejowego przedstawionych na rysunku 1, przeprowadzono analizę wzmocnienia podłoża gruntowego za pomocą wglębnego mieszania gruntu (technologia *Deep Soil Mixing*).

Konstrukcję nawierzchni i podtorza kolejowego przyjęto na podstawie standardów konstrukcyjnych z Id-1 [2]. Na szerokości podstawy przyny podsypanki równej 5,45 m przyłożono obciążenie zastępcze $\sigma_{zd\ max} = 137$ kPa. Obciążenie zostało obliczone

dla linii znaczenia miejscowego, o klasie toru 3, przy dopuszczalnej prędkości 60 km/h i nacisku na oś równym 225 kN.

Do analiz numerycznych wykorzystano program Z_Soil (wersja 12.19), bazujący na metodzie elementów skończonych. Do opisu zachowania się układu „podłoże gruntowe – konstrukcja nasypu kolejowego” zastosowano model sprężysto-idealnie plastyczny z niestowarzyszonym prawem plastycznego płynięcia Coulomba-Mohra.

Uwzględniając dane dotyczące podłoża gruntowego (tabela 1), konstrukcji nawierzchni oraz podtorza kolejowego, zamodelowano nasyp wraz z czterema wariantami wzmocnienia podłoża za pomocą kolumn DSM (*Deep Soil Mixing*). Poszczególne warianty obliczeniowe różnią się między sobą długością, średnicą i rozstawem kolumn (tabela 3). Nasyp kolejowy został wykonany w czterech warstwach, o grubości pojedynczej warstwy 1,0 m. Parametry nasypu wykonanego z piasku średniego o $I_D = 1,0$ wraz z parametrami kolumn DSM zostały przedstawione w tabeli 2.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny projektowanego nasypu kolejowego [2], [3]

Tabela 1. Parametry geotechniczne podłoża gruntowego zalegającego pod nasypem kolejowym [1]

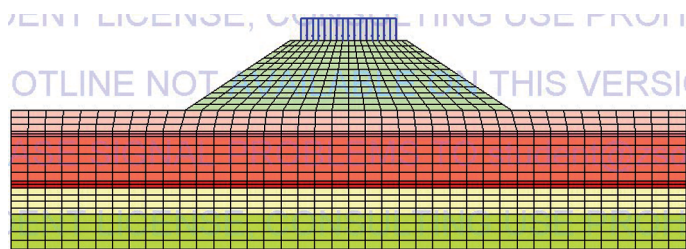
Rodzaj i stan gruntu	Miąszość warstwy h [m]	Wilgotność naturalna w_n [%]	Ciężar objęt. γ [kN/m ³]	Spójność c [kN/m ²]	Kąt tarcia wew. ϕ [°]	Kąt dylatacji ψ [°]	Moduł Younga E [kN/m ²]	Współ. Poissona ν [-]
P _w $I_D=0,50$	1,2	16,00	17,16	0	30,5	23	53000	0,30
P _d $I_D=0,50$	0,3	16,00	17,16	0	30,5	23	53000	0,30
II $I_L=0,41$	2,6	18,85	20,10	10	11,5	9	21700	0,29
P _s $I_D=0,53$	0,4	14,00	18,14	0	33	25	94400	0,25
II $I_L=0,23$	1,5	18,36	20,40	15	14	11	30000	0,29
G _p $I_L=0,23$	2,0	18,36	20,40	15	14	11	30000	0,29

Tabela 2. Parametry geotechniczne nasypu oraz kolumn DSM [1]

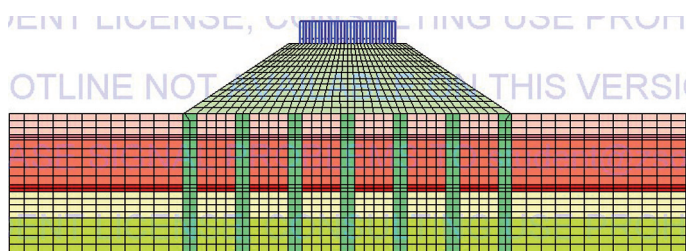
Parametr Materiał	Ciężar objęt. γ [kN/m ³]	Spójność c [kN/m ²]	Kąt tarcia wew. ϕ [°]	Kąt dylatacji ψ [°]	Moduł Younga E [kN/m ²]	Współ. Poissona ν [-]
kolumny DSM	23	1700	60	45	200000	0,45
nasyp kolejowy	18	2	36	27	170000	0,25

Tabela 3. Analizowane warianty wzmocnienia podłoża gruntowego pod nasypem kolejowym [1]

Wariant	Średnica kolumn DSM [m]	Długość kolumn [m]	Rozstaw kolumn DSM w osiach [m]
I bez wzmocnienia	–	–	–
II	0,8	6,0	3,0
III	0,8	8,0	3,0
IV	0,9	6,0	3,0
V	0,8	6,0	2,0



Rys. 2. Wariant I podłoże gruntowe bez wzmocnienia



Rys. 3. Wariant III – podłoże wzmocnione kolumnami DSM o średnicy 0,8 m, długości 8,0 m oraz rozstawie kolumn w osiach równym 3,0 m

Wyniki analiz numerycznych

Za pomocą programu Z_Soil było możliwe określenie minimalnej wartości współczynnika stateczności skarp, wielkości osiadań oraz przemieszczeń (tabela 4).

Tabela 4. Maksymalne wartości osiadań i przemieszczeń oraz minimalne wartości współczynnika stateczności skarp dla nasypu kolejowego [1]

Wariant obliczeniowy	Maksymalne osiadania [m]	Maksymalne przemieszczenia [m]	Minimalny współczynnik stateczności F [-]
I	0,102	0,102	1,1
II	0,048	0,060	1,1
III	0,028	0,033	1,1
IV	0,034	0,035	1,1
V	0,167	0,385	1,1

Kolejnym wariantem obliczeniowym było założenie, że do głębokości 4,1 m pod powierzchnią terenu zalega warstwa gruntu spoistego – pyłu o stopniu plastyczności $I_L = 0,41$ (tabela 5). Wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych zostały przedstawione w tabeli 6.

Tabela 6. Maksymalne wartości osiadań, przemieszczeń oraz minimalne wartości współczynnika stateczności skarp dla analizowanego podłoża gruntowego (por. tabela 5) [1]

Wariant obliczeniowy	Maksymalne osiadania [m]	Maksymalne przemieszczenia [m]	Minimalny współczynnik stateczności F [-]
I	–	–	–
II	0,090	0,142	1,1
III	0,081	0,140	1,1
IV	0,067	0,092	1,1
V	0,055	0,094	1,1

Tabela 5. Zmodyfikowane wartości parametrów geotechnicznych podłoża gruntowego zalegającego pod nasypem kolejowym [1]

Rodzaj i stan gruntu	Mięszość warstwy h [m]	Wilgotność naturalna w_n [%]	Ciężar objęt. γ [kN/m ³]	Spójność c [kN/m ²]	Kąt tarcia wew. ϕ [°]	Kąt dylatacji ψ [°]	Moduł Younga E [kN/m ²]	Współ. Poissona ν [-]
II $I_L=0,41$	4,1	18,85	20,10	10	11,5	9	21700	0,29
Ps $I_p=0,53$	0,4	14,00	18,14	0	33	25	94400	0,25
II $I_L=0,23$	1,5	18,36	20,40	15	14	11	30000	0,29
Gp $I_L=0,23$	2,0	18,36	20,40	15	14	11	30000	0,29

Tabela 7. Wartości zmodyfikowanych parametrów nasypu [1], [4]

Parametr	Ciężar objęt. γ [kN/m ³]	Spójność c [kN/m ²]	Kąt tarcia wew. φ [°]	Kąt dyatacji ψ [°]	Moduł Younga E [kN/m ²]	Współ. Poissona ν [-]
nasyp zbudowany z pospółki o $I_D = 1,0$	18,5	2	42	32	240000	0,2
nasyp zbudowany z żużla o $I_D = 1,0$	20	15	38	29	50000	0,23

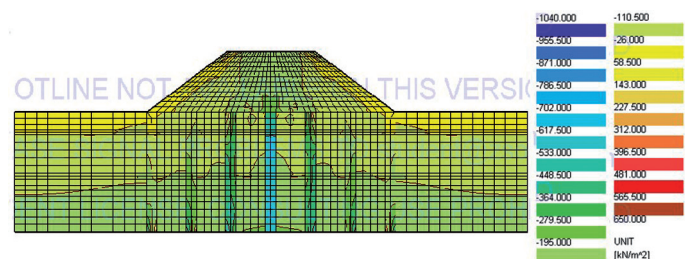
W kolejnym etapie analiz, modyfikacji poddano materiał, z którego zbudowany jest nasyp. Przewidziano dwie sytuacje: nasyp jest zbudowany z pospółki o $I_D = 1,0$ lub z żużla wielkopieczowego o $I_D = 1,0$. Zmodyfikowane wartości parametrów materiałowych nasypu przedstawiono w tabeli 7. Pierwotne parametry podłoża gruntowego pozostały bez zmian (por. tabela 1). W tabeli 8 zamieszczono maksymalne wartości osiadań, przemieszczeń oraz minimalne wartości współczynnika stateczności skarp nasypu dla każdego z analizowanych materiałów nasypu kolejowego.

Tabela 8. Maksymalne wartości osiadań, przemieszczeń oraz minimalne wartości współczynnika stateczności skarp dla nasypu zbudowanego z pospółki o $I_D = 1,0$ (i żużla, $I_D = 1,0$)

Wariant obliczeniowy	Maksymalne osiadania [m]	Maksymalne przemieszczenia [m]	Minimalny współczynnik stateczności F [-]
I	0,329 (0,279)	0,495 (0,330)	1,1 (1,2)
II	0,036 (0,141)	0,036 (0,230)	1,2 (1,5)
III	0,038 (0,128)	0,055 (0,218)	1,3 (1,5)
IV	0,042 (0,113)	0,044 (0,168)	1,3 (1,5)
V	0,027 (0,106)	0,027 (0,124)	1,3 (1,7)

W analizach sprawdzono również, jak zmienia się wartość współczynnika stateczności skarp przy modyfikacji geometrii nasypu. W tym celu przeprowadzono obliczenia dla nasypu o wysokości $h = 4,0$ m i nachyleniu skarp równym 1:2 oraz dla nasypu o wysokości $h = 2,0$ m i nachyleniu skarp równym 1:1,5. Dla wszystkich wariantów obliczeniowych otrzymano minimalną wartość współczynnika stateczności skarp $F = 1,1$.

Za pomocą programu Z_Soil można przedstawić również mapy naprężeń normalnych σ_y dla poszczególnych wariantów obliczeń. Przykładową mapę naprężeń dla wariantu III przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Mapa naprężeń normalnych – wariant obliczeniowy III

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych stwierdzono, że przy założonych warunkach gruntowo-wodnych (tabela 1) najkorzystniejsze jest zastosowanie wzmocnienia w formie:

- kolumn DSM o średnicy 0,8 m, długości 6,0 m oraz rozstawie kolumn w osiach równym 3,0 m (wariant obliczeniowy II),
- kolumn DSM o średnicy 0,8 m, długości 8,0 m oraz rozstawie kolumn w osiach równym 3,0 m (wariant obliczeniowy III),
- kolumn DSM o średnicy 0,9 m, długości 6,0 m oraz rozstawie kolumn w osiach równym 3,0 m (wariant obliczeniowy IV).

Dla przypadku, w którym średnica kolumn wynosi 0,8 m, długość 6,0 m a rozstaw kolumn w osiach jest równy 2,0 m (wariant obliczeniowy 5), stwierdzono, że przy zmianie parametrów podłoża gruntowego i materiału, z którego zbudowany jest nasyp wyniki osiadań i przemieszczeń są bardzo zróżnicowane. Stąd stosowanie wzmocnienia podłoża w tej formie nie jest zalecane.

Ponadto, wzmocnienie podłoża gruntowego za pomocą kolumn DSM dla nasypu zbudowanego z pospółki o $I_D = 1,0$ spowodowało zmniejszenie osiadań prawie o 90% w stosunku do osiadań nasypu kolejowego posadowionego na podłożu bez wzmocnienia.

Z analiz można wysunąć wnioski, że przeprowadzone zmiany geometrii nasypu nie mają większego wpływu na stateczność skarp nasypu w analizowanym przypadku. Największy wpływ ma tutaj rodzaj materiału, z którego zbudowany jest nasyp. Co za tym idzie, największe wartości współczynnika stateczności skarp nasypu uzyskano przy materiale gruboziarnistym (żużel), lecz jego wartość jest zbyt mała w stosunku do wymagań Id-3 [3], a wartości osiadań są większe od dopuszczalnych. W tym przypadku zalecane jest dodatkowe wzmocnienie nasypu.

Dzięki mapom naprężeń stwierdzono, że największe wartości naprężeń otrzymano w kolumnach umiejscowionych w osi nasypu, stąd w praktyce można zastosować wzmocnienie podłoża gruntowego kolumnami rozmieszczonymi w planie w siatce trójkątnej.

Bibliografia

- [1] A. Dyjas, *Analizy numeryczne wzmocnienia podłoża gruntowego pod nowobudowany nasyp kolejowy za pomocą kolumn wykonanych w technologii głębokiego mieszania*, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice 2013
- [2] Id-1 Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Warszawa 2005
- [3] Id-3 Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Warszawa 2009
- [4] PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie ■