

Wzmacnianie podtorza górniczego geosyntetykami

Railway subgrade in mining areas reinforced with geosynthetics



Kazimierz Kłosek

dr hab. inż., prof. nzw.

Wyższa Szkoła Techniczna
w Katowicach Politechnika Śląska,
Wydział Budownictwa

Kazimierz.Kłosek@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne zjawisk związanych z utratą nośności i stateczności podtorza na terenach poddanych oddziaływaniu podziemnej eksploatacji górniczej. Jednym z istotnych mierników opisujących te zjawiska jest utrata wytrzymałości gruntów podtorza. Skutecznym sposobem ograniczenia tych destrukcyjnych zmian jest wcześniejsze wzmacnianie podtorza geosyntetykami. Istotnym kryterium ich stosowania jest właściwy dobór polimerów, ze szczególnym uwzględnieniem ich właściwości reologicznych.

Słowa kluczowe: *Obszar górniczy; Geosyntetyki; Transport mas ziemnych*

Abstract: The study shall present the rudiments of designing and forming of earthen structures for transportation purposes on ground with poor load capacity, mainly in mining areas. Main types of retaining structures, steep slopes, and embankments reinforced using the technology of reinforced soil will be presented. The mechanism of functioning of those structures will be presented, with additional use of geosynthetic reinforcement within the road surfaces and railway track structures, especially in the areas where continuous (subsiding troughs) and non-continuous (collapses, fissures) mining damage occurs. The study contains basic principles for making check calculations of critical load capacity conditions and usability of structures for their assumed service life. Specific and executed structures will be presented, including high embankments for motorways (highways) and railway embankments, located in the areas that are subject to intense mining activity influence.

Keywords: *Mining area; Geosynthetics; Transportation earthen structure*

Budownictwo na terenach górniczych stanowi w wielu krajach specyficzny obszar działalności inżynierskiej [3,9]. Deformacje terenu górniczego sprawiają, że szczególnego znaczenia nabiera zarówno profilaktyka górnicza jak i profilaktyka budowlana. Głównym celem profilaktyki górniczej jest zminimalizowanie deformacji powierzchni a tym samym szkód powstających na powierzchni terenu w zlokalizowanych tam obiektach budowlanych, kubaturowych, komunikacyjnych, hydrotechnicznych i innych. Ten zakres profilaktyki realizuje się poprzez zastosowanie odpowiednich technologii wydobywania kopalni, ograniczenia częściowego lub całkowitego wydobywania pod chronionymi obiektami lub poprzez ustanawianie tak zwanych filarów ochronnych. Profilaktyka budowlana polega z ko-

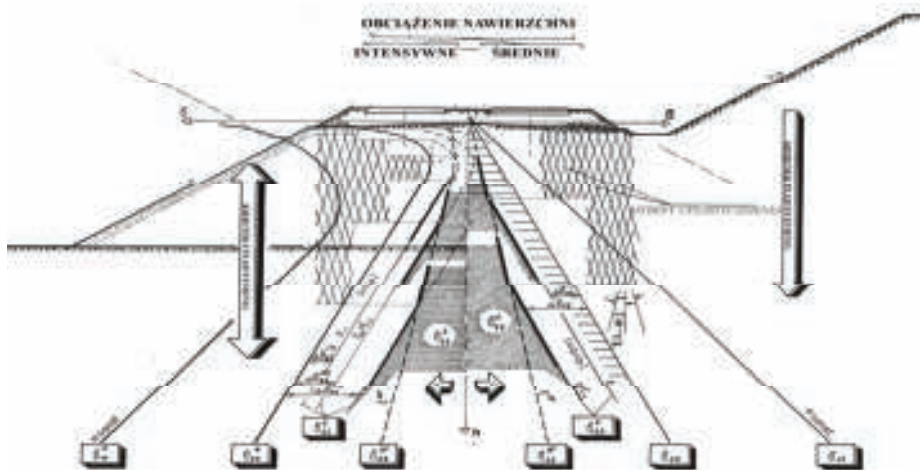
lei na takim kształtowaniu i zabezpieczeniu konstrukcyjnym obiektów budowlanych aby zminimalizować uszkodzenia i deformacje spowodowane głównie poziomymi odkształceniami jednostkowymi powierzchni o charakterze zagęszczającym lub rozluźniającym 'ε' [4,6]. Obiekty określone umownie jako punktowe, takie jak wszelkiego rodzaju budynki, hale przemysłowe, kominy, mosty itp. wykazują odmienny charakter współpracy z podłożem górniczym aniżeli obiekty liniowe, takie jak drogi, linie kolejowe, groble i obwałowania rzek, rurociągi podziemne, linie kablowe itp.

W niniejszej pracy poddano analizie komunikacyjne obiekty liniowe, głównie nasypy i strome zbocza o charakterze ścian oporowych. Ich nośność i stateczność na terenach gór-

niczych podlega znacznej redukcji co może poważnie zagrozić trwałości tych konstrukcji i bezpieczeństwie ich użytkowania w uwagi na odbywający się po nich ruch pojazdów drogowych lub szynowych.

Istota szkód górniczych w komunikacyjnych budowach ziemnych

Deformacje powierzchni terenu górniczego klasyfikuje się z uwagi na ich intensywność (kategorie 0 – 5) oraz z uwagi na ich charakter jako deformacje ciągłe lub nie ciągłe w postaci szczelin, lejów, zapadlisk, uskoków itp. Klasyfikacja ta pozwala ocenić prognozowane zmiany parametrów geometrycznych terenu i zlokalizowanej na jego powierzchni budowli. W analizowanym przypadku



1. Rozwój stref uplastycznienia nie wzmocnionych gruntów podłoża i korpusu podtorza na terenach górniczych w warunkach poziomych odkształceń rozluźniających ϵ [4, 7]

są to specyficzne budowle liniowe (komunikacyjne), w odróżnieniu od obiektów punktowych, do których zalicza się np. budynki itp. W dalszej części pracy zagadnienie ograniczono wyłącznie do analizy tzw. deformacji ciągłych z uwagi na ich dominujący zakres i częstotliwość występowania.

Górnictwem, ciągłą niekiedy obniżeniową opisuje pięć podstawowych parametrów [7]:

- obniżenie terenu górniczego w [m],
- nachylenie terenu $T = dw/dx$ [mm/m] lub [%o],
- krzywizna powierzchni $K = d^2w/dx^2$ [1/km],
- poziome przemieszczenie u [m],
- poziome odkształcenie jednostkowe $\epsilon = du/dx$ [mm/m] lub [%o], rozluźniające ϵ_r i zagęszczające ϵ_z .

Odkształceniom tym towarzyszy redukcja parametrów wytrzymałościowych gruntu. Literatura techniczna problemu [5] oraz liczne badania wykazały, że na terenach górniczo aktywnych parametry te nie mogą być uznane za wielkości stałe, gdyż podlegają charakterystycznym zmianom, które można opisać relacją:

$$\tau_{\max} = \sigma'_{11} \text{tg} \Phi_{\epsilon} + c_{\epsilon} = \sigma'_{11} \text{tg} \Phi_{\epsilon} + c_s + \beta(t) \Sigma w >$$

$$> \tau_{\epsilon}^r = \sigma'_{11} \text{tg} \Phi_{\epsilon} + \beta(t) \Sigma w > \tau_{\min} = \sigma'_{11} \text{tg} \Phi_{\epsilon} \quad (1)$$

gdzie:

σ'_{11} - efektywne naprężenia normalne,

c_s - strukturalna część ogólnej spójności gruntu, tzw. spójność wzmocnienia; w gruntach nasympowych występująca jako efekt procesów zagęszczania,

Σw - spójność gruntu wywołana więziami typu wodno-koloidalnego przy wilgotności w_t , tzw. spójność pierwotna; w trakcie urabiania gruntów w wykopach oraz transporcie ulega ona zasadniczej redukcji

$\beta(t)$ - współczynnik uwzględniający intensywność procesu deformacji terenu górniczego; $1 > \beta(t) > 0$; w analizowanym przypadku można przyjąć $\beta(t) = 0$, pozostałe oznaczenia przyjęte na Rys. 1:

σ_{22}^* - naprężenia poziome – całkowite, uwzględniające obciążenie własne gruntu (rozpór), ciężar nawierzchni i składową obciążenia osiowego taboru,

σ_{22}^{gr} - graniczne naprężenie poziome w tzw. totalnym, czynnym stanie naprężenia (σ_{22}^{\min}).

Model numeryczny

Przyjęte do zamodelowania wzmocnienia w postaci materaca z kruszywa i geosyntetyku (geosiatki) różniły się doraźną wytrzymałością na rozciąganie: 40 kN/m – geosiatka z PP, 400

kN/m – geosiatka z PVA i 800 kN/m – geosiatka z Aramidem.

Zgodnie z europejskimi wytycznymi EC7 [1,8], jako parametr wytrzymałościowy rozpatrywanych w poszczególnych przypadkach modelowania geosiatek przyjęto obliczeniową (długoterminową) wytrzymałość na rozciąganie F_d wyznaczoną na podstawie wzoru (2):

$$F_d = \frac{F_k}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \dots \cdot A_n \cdot \gamma} \quad [\text{kN/m}] \quad (2)$$

gdzie:

F_k - wartość doraźna wytrzymałości na rozciąganie [kN/m],

$A_{1...n}$ - współczynniki materiałowe, A_1 - współczynnik uwzględniający pełzanie materiału,

A_2 - współczynnik uwzględniający uszkodzenia mechaniczne materiału podczas wbudowywania, transportu geosyntetyku,

A_3 - współczynnik uwzględniający sposoby łączenia warstw geosyntetyków,

A_4 - współczynnik uwzględniający wpływ środowiska,

A_n - współczynniki uwzględniające inne, dodatkowe wpływy np. górnicze oraz wstrząsy typu sejsmicznego jak i para sejsmicznego wywołane działalnością górnictwem,

γ - współczynnik bezpieczeństwa materiałowego w metodzie globalnego współczynnika bezpieczeństwa $\gamma = 1,75$.

W zależności od rodzaju polimeru, z którego wytworzona geosiatkę przyjęto (Bauen..2003) odpowiednie wartości współczynników materiałowych (tablica 1).

Tab. 1. Współczynniki materiałowe przyjęte do obliczeń

Współczynnik materiałowy	Surowiec		
	PP	PVA	Aramid
A1	5,0	2,5	2,5
A2	2,0	2,0	2,0
A3	1,0	1,0	1,0
A4	3,3	2,0	3,3

Wyroby geotekstylne posiadają zróżnicowane właściwości fizyko-mechaniczne, toteż prawidłowy ich dobór wymaga odpowiedniej wiedzy. Z tego względu odpowiednie wytyczne – nakazują sprawdzenie, zwłaszcza dla odpowiedzialnych budowli nasypowych i założonego okresu ich eksploatacji, dwóch warunków:

- wytrzymałości na rozciąganie (obliczeniowej F_d),
- dopuszczalnych odkształceń.

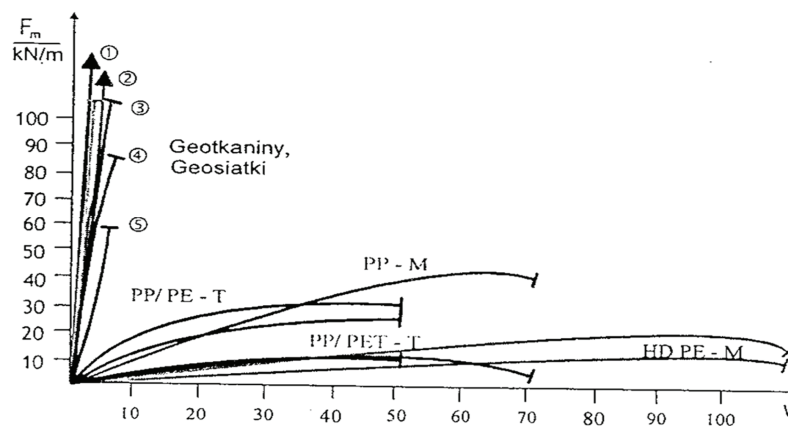
Konsekwencją obniżonej trwałości materiału zbrojenia może być znaczne skrócenie okresu eksploatacji obiektu a nawet jego awaria.

Cechą charakterystyczną niektórych wyrobów geotekstylnych, takich jak PP/PET oraz HDPE, ujętą w odpowiednich normach jest zmienna w czasie sztywność naprężonego geosyntetyku co wynika z cech reologicznych materiału.

Numeryczny model budowli ziemnej posadowionej na terenie górniczym 'zbudowano' wykorzystując program Z_Soil [2] należący do grupy programów bazujących na metodzie elementów skończonych. Przyjęto, iż na nasypie zlokalizowana jest 2-torowa linia kolejowa (Rys. 3). Dla poszczególnych warstw modelu podłoża, nasypu i konstrukcji nawierzchni przyjęto parametry geotechniczne i materiałowe (tablica 2).

Analiza wyników

Na podstawie wyników badań numerycznych można stwierdzić, że rozwój stref uplastycznienia jest bar-



2. Zależność 'siła rozciągająca F [kN/m] – wydłużenie v [%]' dla różnych wyrobów geotekstylnych (1-Aramid, 2-poliester, 3-szkło syntetyczne, 4-poliester, 5-polietylen wysokiej gęstości)



3. Schemat obliczeniowy dla nasypu zbrojonego w poziomie podstawy (ruch lekkich pojazdów)

dzo intensywny, i w przypadku braku wzmocnienia podstawy nasypu, obejmuje cały jego korpus już przy intensywności poziomych odkształceń rozluźniających $\epsilon=1,5\text{mm/m}$. W przypadku wzmocnienia podstawy nasypu matercem tłuczniowym w osłonie geosiatki polipropylenowej PP, cechującej się znaczną wydłużalnością, strefy plastyczne dla $\epsilon=1,5\text{mm/m}$ obejmą górne warstwy nasypu co będzie prowadziło do uszkodzenia nawierzchni. Wzmocnienie długotrwale komunikacyjnych budowli ziemnych na terenach górniczych przy użyciu geosiatek wykonanych z surowca PP /PE/HDPE jest

więc niewłaściwe, gdyż można je stosować wyłącznie do obiektów tymczasowych.

Zamiana surowca geosiatki na PVA wpływa istotnie na skuteczność profilaktyki budowlanej nasypów na terenach górniczych. Dla podwójnej geosiatki zlokalizowanej w podstawie nasypu i w poziomie jego korony, pod nawierzchnią, nasyp wraz z nawierzchnią zachowuje cechy materiału sprężystego w znacznie większym obszarze nawet dla $\epsilon=1,5-4,5\text{ mm/m}$.

W przypadku materaca trójwarstwowego sytuacja jest jeszcze korzystniejsza. Należy nadmienić, że przeprowadzone symulacje numeryczne zostały zweryfikowane w warunkach terenowych, gdzie uzyskały pełne potwierdzenie. Rezultaty przytoczonych analiz mogą być przydatne również na terenach sejsmicznych w odniesieniu do zlokalizowanych tam komunikacyjnych budowli ziemnych, obwałowań rzek i zbiorników, stromych zboczy itp.

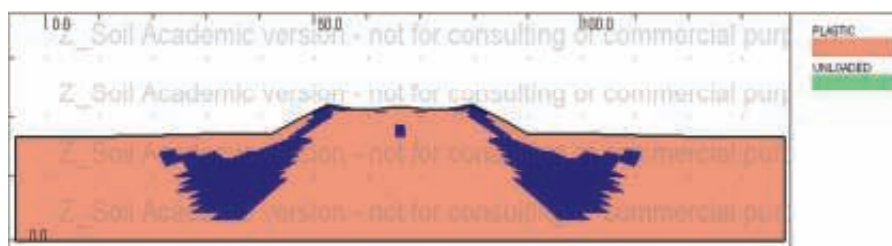
Tab. 2. Przyjęte do obliczeń numerycznych parametry geotechniczne poszczególnych warstw modelu

Warstwa	Model materiałowy	E [MPa]	γ [kN/m ³]	ν	C [kPa]	Φ [°]
Podłoże	Coulomba-Mohra	30	22	0,3	33*	18
Nasyp (NB)	Coulomba-Mohra	60	18	0,3	20	30
W-wa ochronna	Coulomba-Mohra	200	30	0,3	3	42
Podsypka	Sprężysty	2800	30	0,3	-	-
Geosiatka	Membrana anizotropowa	Zmienne zależne od geosiatki	Parametry membrany PP/PVA przyjęte w zależności od geosiatki wg 0			
Kruszywo w materacu	Coulomba-Mohra	120	20	0,3	8	38

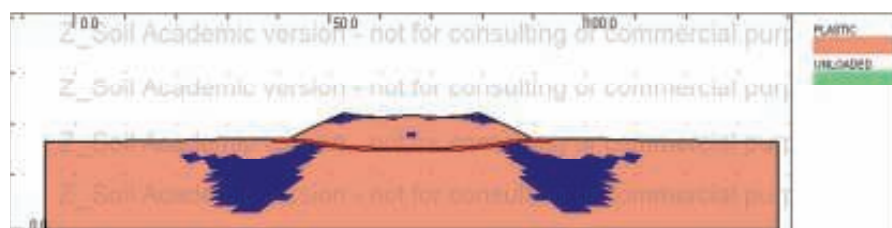
* wartość spójności 'c' poddano redukcji odpowiadającej poszczególnym wartościom odkształceń jednostkowych ϵ . Zredukowana wartość spójności gruntu podłoża wynosiła odpowiednio: 0,92 ($\epsilon=0,3\text{ mm/m}$), 0,75 ($\epsilon=1,5\text{ mm/m}$), 0,67 ($\epsilon=3,0\text{ mm/m}$) spójności początkowej.

Materiały źródłowe

- [1] Bauen mit Geokunststoffen (2003). Ein Handbuch für den Geokunststoff – Anwender. Verbund für Geokunststoffe (SVG),
- [2] Z_Soil®.PC v2007 3D Academic, Zace Services Ltd, Lausanne, Switzerland.
- [3] Klosek K.(2007): Highway and Rail Track Foundations In Mining Site Areas. Proceedings of the Int. Symp. On 'Innovation & Sustainability of Structures – ISSS'2007; Shanghai Nov.28-30,2007. Printing-2008 by Southeast University Press, Nanjing, China,, vol2 p.856-863
- [4] Klosek K. (1999). Slope stability of rectify coal waste embankments on mining areas. Proceedings 16th Annual National Meeting of the ASSMR, Scottsdale, AR,USA,
- [5] Klosek K.(1996). Use of geosynthetics for strengthening road surface and subbase in areas with the mining activity. Proc. of the Int.Symp. on 'Earth Reinforcement',vol.I Fukuoka, Japan, Ed. - Balkema, Rotterdam: 609-614
- [6] Klosek K. (1994). Prevention of damage to highways and railroads in mining areas. Proceedings of the Int.Land and Mine Drainage Conf., Pittsburgh, PA,USA, April 24-29,1994:101-110.
- [7] Klosek K. (2001).Extreme impact of underground mining on linear transportation structures. Proceedings 18th Conf. Of ASSMR, Albuquerque, NM,USA, June 3-7,2001: 142-150
- [8] Klosek K.: Badania geosyntetyków w budownictwie kolejowym. WST – Współczesne Systemy Transportowe.1/2016, Katowice; s.26-33
- [9] Klosek k.: Foundations model for transportation infrastructure in mining site areas. Proceedings of the 6th International Conference On Structural Engineering, Mechanics and Computation Cape Town – South Africa, Ed. CRC 2016, Balkema – Taylor&Francis Group, London UK



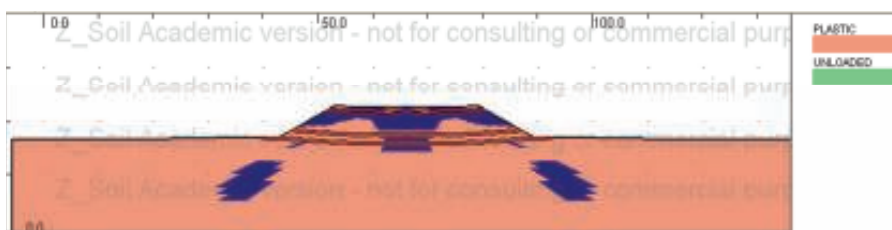
4. Deformacje przekroju poprzecznego i rozwój stref plastyczności dla modelu bez materaca z geosiatki; poprzeczne rozpełzanie terenu górniczego $\epsilon = 1,5 \text{ mm/m}$.



5. Deformacje przekroju poprzecznego i rozwój stref plastyczności dla modelu z materacem; geosiatka PP; $\epsilon = 1,5 \text{ mm/m}$.



6. Deformacje przekroju poprzecznego i rozwój stref plastyczności dla modelu z podwójnym materacem geosiatka PVA; $\epsilon = 1,5 \text{ mm/m}$.



7. Deformacje przekroju poprzecznego i rozwój stref plastyczności dla modelu z potrójnym materacem; geosiatka PVA; $\epsilon = 1,5 \text{ mm/m}$.

Wnioski

Przedstawione w pracy wyniki analiz numerycznych współdziałania komunikacyjnych i hydrotechnicznych budowli ziemnych z podłożem górniczym wskazują na istotne zasady profilaktyki budowlanej. Powinna ona polegać na stosowaniu wzmocnień wykorzystujących efekt gruntu zbrojonego geosyntetykami. Skuteczność tych wzmocnień jest zależna przede

wszystkim od właściwej analizy statycznej budowli oraz doboru zbrojenia z uwzględnieniem jego wytrzymałości długotrwałej gwarantującej trwałość i niezawodność pracy konstrukcji w całym projektowanym okresie jej użytkowania tj. z reguły nie krótszym aniżeli 50-120 lat. ◀