Kazimierz KŁOSEK Politechnika Śląska, Gliwice

MODELOWANIE PODTORZA ZWŁASZCZA NA TERENACH GÓRNICZYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono podstawy teoretyczne opisu i redystrybucji naprężeń i odkształceń w podtorzu poddanym oddziaływaniu podziemnej eksploatacji górniczej. Dotyczy to głównie destrukcyjnych oddziaływań poziomych odkształceń rozluźniających powodujących chwilową utratę nośności górnych warstw nośnych podtorza i nawierzchni. Do opisu redystrybucji składowych stanu naprężenia wykorzystano model ośrodka ziarnistego o cechach rozporowych.

MODELLING THE TRACK SUBGRADE ESPECIALLY IN MINING AREAS

Summary. The paper is focused on the theoretical grounds for the description and redistribution of stresses and strains in the subgrade exposed to the impacts from underground mining, especially the destructive action of horizontal loosening strains that lead to temporary loss of the load-bearing capacity of the upper layers and the pavement. The description of the redistribution of the stress state components was based on the model of granularity with expansion features.

1.Wstęp

Podtorze górnicze stanowi specyficzny i zarazem trudny w opisie matematycznym przypadek geoinżynierii komunikacyjnej. Wprawdzie tereny górniczo aktywne zajmują jedynie niewielki fragment powierzchni kraju, to jednak ich znaczenie transportowe jest trudne do przecenienia z uwagi na niezwykle gęstą sieć infrastruktury transportu szynowego zarówno publicznego, jak i niepublicznego [4,6].

Podjęta w pracy analiza zmierzająca do modelowania procesu współdziałania nawierzchni ze słabo nośnym podtorzem może być wykorzystana również na terenach niegórniczych, gdzie dominują grunty o niskiej nośności.

2. Redystrybucja składowych stanu naprężenia i odkształcenia w podtorzu górniczym

Stan naprężeń własnych wywołanych ciężarem ośrodka wbudowanego w korpus podtorza oraz ciężarem nawierzchni opisuje tensor:

2005 Nr kol. 1692

(1)

(3)

(4)

$$v_{ik} = \gamma'_0 h \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & (m-1)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & (m-1)^{-1} \end{bmatrix},$$

gdzie: γ'_{o} – średni ważony ciężar objętościowy nawierzchni i podłoża,

m=1/v - współczynnik odkształcenia poprzecznego gruntu (liczba Poissona),

v – współczynnik Poissona dla podłoża.

Spowodowane przez siły ciężkości naprężenia pierwotne tworzą zawsze tensor niekulisty. Tego rodzaju stan naprężeń, porównywalny z edometrycznymi warunkami pierwotnej, sedymentacyjnej konsolidacji, wpływa na późniejszą reakcję gruntów podłoża obciażonego ruchem pojazdów szynowych.

W analizowanym punkcie podłoża tensorowi (1) odpowiada tensor odkształcenia:

$$\varepsilon_{ik} = \varepsilon_0 \delta_{ik} + \mathbf{v}_{ik} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} - \varepsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & -\varepsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & -\varepsilon_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$
(2)

gdzie: $\varepsilon_0 = 1/3\varepsilon_{11}$ - odkształcenie średnie, izotropowe,

 $\begin{array}{lll} \delta_{ik} & \mbox{- tensor kulisty,} \\ v_{ik} & \mbox{- dewiator tensora odkształceń.} \end{array}$

Dla uproszczenia przyjęto, że materiał tworzący podłoże jest fizycznie jednorodny, izotropowy oraz że posiada cechy ciała quasi-sprężystego z określonym warunkiem plastyczności. Przyjęcie tych założeń pozwala operować pewnym podobieństwem pomiędzy tensorami stanów odkształcenia i naprężenia, co sprawia, że w dowolnym punkcie ośrodka kierunki główne obu stanów są współosiowe. Poziomemu rozluźnieniu ośrodka gruntowego εr towarzyszą określone zmiany stanu naprężenia w podłożu górniczym oraz samym korpusie drogowych budowli ziemnych, co opisuje tensor:

 $\Delta \sigma_{ik}^{*} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2G(m+\rho)\epsilon_{22}/(m-1) & 0 \\ 0 & 0 & 2G(1+m)\epsilon_{22}/(m-1) \end{bmatrix},$

gdzie: $\rho = \varepsilon_{33/}\varepsilon_{22}$ - stosunek odkształceń poziomych na kierunkach głównych [2,9],

 $G = E_{\varepsilon} m./2(m.+1)$ - moduł sprężystości poprzecznej gruntu podłoża drogowego,

 $E_{\epsilon} = \alpha_r E_o$ - moduł ściśliwości podłoża w warunkach poziomych odkształceń rozluźniających ośrodka,

 E_0 - moduł ściśliwości dla $\varepsilon_{22} = 0$; α_r - współczynnik zmienności modułu ściśliwości

rozluźnianego podłoża gruntowego [2]; dla $\varepsilon_{22} = \varepsilon_r > 0$ współczynnik $\alpha_r < 1$. Odpowiadające tensorowi (3) przyrosty odkształceń jednostkowych można również zapisać w układzie macierzowym:

 $\Delta \epsilon_{ik}^{r} = \frac{\Delta \sigma_{22}}{2G} \begin{bmatrix} (1+\rho)/(m+\rho) & 0 & 0 \\ 0 & (1-\rho)/(m+\rho) & 0 \\ 0 & 0 & \rho(m-1)/(m+\rho) \end{bmatrix},$

96

Modelowanie podtorza zwłaszcza ...

Ponieważ pionowe naprężenia własne σ_{11} w podtorzu nie ulegają praktycznie zmianom [2] w trakcie poziomych odkształceń rozluźniających, zasadniczy efekt redystrybucji dotyczy naprężeń poziomych, co dla sprężysto-plastycznego modelu opisują zależności:

$$\sigma_{ik}^{r} = \sigma_{22}^{\bullet} - \Delta \sigma_{ik}^{r} > \sigma_{22}^{gr} = \sigma_{22}^{min}, \qquad (5)$$

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

 σ_{22}^{gr} - wartość graniczna naprężenia poziomego w tzw. totalnym, czynnym stanie naprężenia(σ_{22}^{min}):

$$\sigma_{22}^{\min} = \sigma_{11}^* \operatorname{tg}^2(\pi/4 - \Phi_{\varepsilon}/2) - 2c_{\varepsilon}(\pi/4 - \Phi_{\varepsilon}/2), \qquad (6)$$

gdzie: c_{ϵ} , Φ_{ϵ} – zredukowana spójność i kąt tarcia wewnętrznego gruntu dla podłoża górniczego.

Zależność (5) można również wobec (4) zapisać w postaci:

$$\sigma_{22}^{r} = \sigma_{22}^{\bullet} - \Delta \sigma_{ik}^{r} = \gamma h(m-1)^{-1} - 2G(m+\rho)(m-1)^{-1} \varepsilon_{22} \ge \sigma_{22}^{min}$$
(7)



- Rys.1. Wpływ prekonsolidacji (historia obciążenia) górnych warstw podtorza na wzrost naprężeń poziomych σ₂₂w podsypce i podłożu gruntowym w okresie poprzedzającym rozwój poziomych odkształceń górniczych ε
- Fig.1. Influence of subgrade upper layers preconsolidation (load process) on horizontal stresses rise σ₂₂in the ballast and subsoil, before the development of horizontal mining strains ε

Uproszczoną ilustrację wyników przedstawionych analiz współdziałania korpusu budowli nasypowej z rozluźniającym się podłożem górniczym prezentuje rys.2. Z uwagi na prekonsolidację gruntów nasypowych jak i warstw podsypkowych samej nawierzchni (rys.1) rozwój stref uplastycznienia może w praktyce zintensyfikować te zjawiska, zwłaszcza w górnych warstwach torowiska jak i samej nawierzchni, która będzie wymagać dodatkowych wzmocnień konstrukcyjnych [1,2].



Rys.2. Współdziałanie korpusu kolejowej budowli ziemnej z rozluźniającym się podłożem górniczym Fig.2. Cooperation of railway ground building frame with loosening mining subsoil

Parametry wytrzymałościowe gruntów (zwłaszcza spoistych) na terenach górniczo aktywnych nie mogą być uznane za wielkości stałe, gdyż podlegają charakterystycznym zmianom, które można opisać relacją [2,3,5] :

 $\tau_{max} = \sigma_{11}^{\prime} tg \Phi_{\epsilon} + c_{\epsilon} = \sigma_{11}^{\prime} tg \Phi_{\epsilon} + c_{s} + \beta(t) \Sigma w > \tau_{\epsilon}^{\tau} = \sigma_{11}^{\prime} tg \Phi_{\epsilon} + \beta(t) \Sigma w > \tau_{min} = \sigma_{11}^{\prime} tg \Phi_{\epsilon} , \quad (8)$

gdzie: σ'11 - efektywne naprężenia normalne,

cs - strukturalna część ogólnej spójności gruntu, tzw. spójność wzmocnienia,

- $\Sigma w spójność gruntu wywołana więziami typu wodno-koloidalnego przy wilgotności <math>w_{\tau}$, tzw. spójność pierwotna,
- β(t) współczynnik uwzględniający intensywność procesu deformacji terenu górniczego; 1>β(t)>0.

Modelowanie podtorza zwłaszcza ...

Wytworzony w obrębie przypowierzchniowej strefy podtorza stan naprężeń na skutek oddziaływań aktywnego górniczo podłoża podlega charakterystycznym zmianom. Jak wskazują na to przeprowadzone badania laboratoryjne, poziome odkształcenia rozluźniajace rzędu 1,5-3mm/m dla gruntów sypkich i 4-6mm/m dla gruntów spoistych doprowadzają do destabilizacji naprężeń poziomych w podtorzu, a strefa stanu granicznego sięga wówczas głębokości 4-6m. Jest to obszar znajdujący się w tzw. totalnym czynnym stanie rankinowskim (rys.2). Interpretację tego zjawiska w ujęciu metody ścieżek naprężenia ilustruje rys.3.



Rys.3. Interpretacja warunków pracy podtorza na terenach górniczych w ujęciu metody ścieżek naprężeń

Ścieżce naprężeń dla pierwotnego obciążenia podłoża odpowiadają punkty PCdB leżące na linii K_o. Można przyjąć, że cykliczność obciążeń użytkowych doprowadzi po określonym czasie do redukcji odkształceń trwałych w podtorzu, co obrazuje pętla histerezy AdBc w górnej części rysunku. Rejestrowany w tym okresie trwały przyrost naprężeń poziomych podczas kolejnych odciążeń sprzyja trwałej zmianie wartości współczynnika rozporu bocznego, który przemieszcza się z linii K_o na K_o*. Prekonsolidacja gruntu sprawia zatem, że wartość tego współczynnika jest po krótkim czasie znacznie większa od wyjściowej (geostatycznej). Podczas rozwoju poziomych odkształceń rozluźniających podłoża górniczego ścieżki naprężeń wyprowadzone z punktu C lub A, przy określonej i stosunkowo niewielkiej wartości odkształcenia $\varepsilon_{22} = \varepsilon_r$, mogą osiągnąć linię czynnego stanu granicznego K_f = K_a. Następuje wówczas chwilowa utrata wytrzymałości gruntu na ścinanie do momentu wytworzenia się nowego, stabilnego układu naprężeń w podtorzu. Jest to szczególnie niekorzystny etap wspólpracy podtorza górniczego z nawierzchnią, cechujący się przyrostem deformacji trwałych i związanych z nimi nierówności pionowych oraz poziomych nawierzchni.

Fig.3. Interpretation of subgrade working conditions in mining areas according to stress paths method

Deformacje zagęszczające ε_z wykazują znaczne zróżnicowanie wartości granicznych, prowadzących do osiągnięcia linii biernego stanu $K_f = K_p$, i jako takie nie stanowią w praktyce zagrożenia dla nośności podtorza.

3. Dobór modelu obliczeniowego podtorza

Modele mechaniczne stosowane do opisu podtorza można, najogólniej rzecz biorąc, podzielić na ciągłe i dyskretne. Modele zaliczane do pierwszej grupy są powszechnie stosowane w mechanice gruntów i skał, uznając je w sensie makroskopowym za ośrodki ciągłe. Założenie takie odpowiada większości spotykanych w geoinżynierii problemów inżynierskich. Modele zaliczane do grupy drugiej uwzględniają fakt rozdrobnienia (nieciągłości strukturalnej) materiałów podsypek i podtorza, traktując je jako ośrodki dyskretne. Istnieją tu również możliwości podejścia pośredniego, czego przykładem są rozwiązania bazujące na teorii stanów granicznych. Za szczególnie adekwatny do fizycznych cech górnych warstw nawierzchni uznano model podtorza jako ośrodka rozdrobnionego o cechach rozporowych, wywodzący się z koncepcji Kandaurova-Müllera [7]. Zapisane w ujęciu tej teorii różniczkowe równania równowagi ośrodka ziarnistego obciążonego quasistatycznie dla zagadnienia płaskiego przyjmują postać:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} = K_{\epsilon} \cdot x_1 \cdot \frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x_2^2} \\ \sigma_{12} = \sigma_{21} = -K_{\epsilon} \cdot x_1 \cdot \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_2} \\ \sigma_{22} = K_{\epsilon} \left(\sigma_{11} + K_{\epsilon} \cdot x_1^2 \cdot \frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x_2^2} \right) \end{cases}$$
(9)

Stochastyczny rozkład oddziaływań międzyziarnowych od pojedynczej siły skupionej opisuje zależność:

$$\sigma_{11} = \frac{P}{x_1 \sqrt{2\pi\pi} \epsilon} \cdot \exp\left(-\frac{x_2^2}{2K_\epsilon \cdot x_1^2}\right), \qquad (10)$$

gdzie x_{1,2} – współrzędne analizowanego punktu.

Uzmiennioną wartość współczynnika rozporu bocznego ośrodka rozporowego (podsypki) opisuje zależność:

$$K_{\varepsilon}^{r} = \sigma_{22}^{r} / \sigma_{11} \ge K_{min} = tg^{2}(\pi/4 - \phi^{*}/2), \qquad (11)$$

gdzie: $\phi^* = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(\operatorname{tg}\phi + c/\sigma_{11})$; uogólniona wartość kąta tarcia wewnętrznego ośrodka.

Dla hipotezy o obciążeniu odcinkowo parabolicznym w podstawie podkładu otrzymamy składowe naprężeń wypadkowych w podtorzu:

$$\begin{cases} \delta_{11} = \frac{2p\eta_1^2 K_c}{b^2} \left\langle (XY+1)[\phi(X) - \phi(Y)] - \sqrt{\frac{2}{\pi}} [X \exp(-0.5Y^2) - Y \exp(-0.5X^2)] + \\ + \lambda \left\{ [(X-Z)(Y-Z) + 1][\phi(Z-Y) - \phi(Z-X)] - \sqrt{\frac{2}{\pi}} [[(Z-Y) \exp[-0.5(Z-X)^2]]] \right\} \right\rangle \\ \delta_{22} = \frac{2p\eta_1^2 K_c}{b^2} \left\langle K_c \{ (XY+3)[\phi(X) - \phi(Y)] - \frac{1}{\eta_1} \sqrt{\frac{2K_c}{\pi}} [(b+\eta_1 \sqrt{K_c} X) \exp[-0.5(Z-X)^2]] \right\} \\ = \frac{2p\eta_1^2 K_c}{b^2} \left\langle K_c \{ (XY+3)[\phi(X) - \phi(Y)] - \frac{1}{\eta_1} \sqrt{\frac{2K_c}{\pi}} [(b+\eta_1 \sqrt{K_c} X) \exp[-0.5(Z-X)^2] + (b-\eta_1 \sqrt{K_c} Y) + (b-\eta_$$

Ilustrację graficzną analizy numerycznej uzyskanych rozwiązań prezentuje rys.4.

Izobary naprężeń pionowych (a), poziomych (b) i stycznych (c) przedstawione na rys.4 ilustrują dystrybucję wszystkich składowych stanu naprężenia w górnych warstwach podsypki i podtorza. Szczególnie charakterystyczne jest tu zróżnicowanie rozkładu naprężeń pionowych, wskazujące na potencjalnie kilkakrotnie większą koncentrację naprężeń w strefie torowiska dla podtorza górniczego w stosunku do stanu wyjściowego, jak dla zageszczonego - stabilnego tłucznia (KE=1,5). Wzrost naprężeń pionowych przekazywanych na torowisko nie wynika przy tym ze wzrostu nacisków osiowych taboru (te są relatywnie stałe), lecz z istotnej zmiany w dystrybucji tych naprężań do podtorza. O ile zanik naprężeń pionowych pod podkładem w podsypce zagęszczonej jest szczególnie intensywny, to w przypadku rozluźnienia struktury ośrodka naprężenia te penetrują znacznie głębsze strefy podtorza. Efekt ten wyjaśnia istotną degradację przeciążonego podtorza (teoretycznie do 400%), które podlega w tych warunkach wzrostowi trwałych odkształceń strefy torowiska. Proces ten przejawia się na powierzchni dodatkowymi, niejednorodnymi deformacjami nawierzchni [4,7], co znacznie pogarsza parametry eksploatacyjne linii. Zmusza to służby utrzymania do licznych ograniczeń prędkości oraz znacznie wyższych nakładów na utrzymanie całej infrastruktury liniowej kolei na terenach górniczych. W praktyce najskuteczniejszym sposobem kompensacji tych zjawisk jest stosowanie w górnych warstwach podtorza odpowiednich wzmocnień, głównie z wykorzystaniem geosyntetyków [1,3].



Rys.4. Składowe stanu naprężenia w jednorodnym podtorzu poddanym poziomemu rozluźnieniu dla K_ε =0,1 oraz prekonsolidowanym dla K_ε = 1,5 w warunkach podłoża nie górniczego
 Fig.4. Components of stress state in homogenous subgrade exposed to horizontal loosening where K_ε =0,1 and preconsolidated with K_ε =1,5 in non-mining subsoil conditions

4. Wnioski

Przedstawione w pracy modele opisujące współdziałanie nawierzchni dróg szynowych z podtorzem górniczym oraz ich analiza upoważnieją do następujących wniosków:

- sprecyzowane w ujęciu teoretycznym, ogólne warunki przegrupowania składowych stanu naprężenia i odkształcenia w podtorzu zlokalizowanym na terenie górniczym dobrze opisują podstawowe zjawiska i kryteria zmian nośności podtorza;
- przedstawiony w pracy model obliczeniowy aktywnej strefy podłoża rusztu torowego bazujący na rozbudowanej propozycji Kandaurova-Mullera, będący dyskretnym (strukturalnym) urzeczywistnieniem koncepcji zapisu dla równań konstytutywnych ośrodków rozdrobnionych o cechach rozporowych, stanowi wiarygodny fizykalnie opis zjawisk zachodzących w podtorzu;
- przyjęty model, bazujący na probabilistycznej koncepcji rozkładu oddziaływań międzyziarnowych (gruntów, podsypek kolejowych itp.) stwarza możliwość formułowania i rozwiązywania wielu innych zagadnień geomechaniki podtorza kolejowego, nie tylko górniczego.

Literatura

- Ajdukiewicz J., Kłosek K.: Kryteria doboru oraz weryfikacja skuteczności stosowania geosyntetyków w podtorzu kolejowym. Materiały XI Konferencji Naukowo- Technicznej "Drogi Kolejowe '01 ", Wrocław- Żmigród 21-23.11.2001, s.46
- 2. Klosek K. 1999. Slope stability of rectify coal waste embankments on mining areas. Proceedings 16th Annual National Meeting of the ASSMR, Scottsdale, AR, USA,
- 3. 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
- 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
- 5. Klosek K. 1995. Earthen structures in mining areas. Proceedings of the 12th National Meeting of the ASSMR .Gillette, WY, USA, June 5-8, 1995: 494-501
- 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
- Klosek K. : Rail track in mining site areas. International Seminar on 'Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction' ISSMandGE, Athens, 16-17 December 2004; p.233-238