Kazimierz KŁOSEK, Mirosław KOTASIŃSKI, Bartłomiej GRZESIK

Politechnika Śląska, Gliwice

WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA WZMOCNIONEGO PODŁOŻA KOLEJOWYCH BUDOWLI ZIEMNYCH NA TERENACH GÓRNICZYCH

Streszczenie. Podziemna eksploatacja kopalin użytecznych stwarza istotne zagrożenie dla trwałości obiektów komunikacyjnych. Kolejowe budowle ziemne jako obiekty typowo liniowe są w sposób szczególny narażone na niekorzystne oddziaływanie eksploatacji górniczej. Jednym ze sposobów ich zabezpieczenia jest zbrojenie podłoża geosiatkami. W referacie przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych charakterystyk zmienności współczynnika rozporu bocznego "K" w funkcji intensywności poziomych odkształceń rozluźniających ε_r dla ośrodka gruntowego bez wzmocnienia oraz wzmocnionego geosiatkami. Badania potwierdziły korzystny wpływ wzmocnienia ośrodka gruntowego poddanego oddziaływaniu poziomych odkształceń rozluźniających na rozkład naprężeń, a tym samym na efektywny wzrost jego nośności do IV kategorii terenu górniczego włącznie.

TEST VERIFICATION OF THE SUBSOIL REINFORCED WITH GEO-MEMBRANE IN EARTHEN RAIL TRANSPORTATION STRUCTURES IN MINING AREAS

Summary. Underground extraction of mineral deposits poses a substantial threat to the durability of transportation structures. Earthen rail transportation structures, being typically linear, are particularly exposed to the mining impacts. One of the protection methods involves the reinforcement of the subsoil with geo-membranes. The scope of the paper is the presentation of laboratory test results of the characteristics of the variation of lateral strut coefficient K in the form of the intensity function of horizontal loosening strains ε_r for the soil without reinforcement and with geo-membrane reinforcement, accordingly. The test results confirm the positive impact of the geo-grid reinforcement on the distribution of stresses in the subsoil exposed to horizontal loosening strains which leads to improved load bearing capacity of the subsoil up to classification category IV including mining areas.

1.Wstęp

Podziemna eksploatacja kopalin użytecznych, ze względów gospodarczych w pełni uzasadniona, stanowi istotny czynnik zagrażający środowisku naturalnemu człowieka. Niekorzystne procesy i zjawiska towarzyszące tej działalności potęguje w warunkach polskiego górnictwa fakt dużej koncentracji rejonów wydobywczych, przy równoczesnym wysokim stopniu zurbanizowania powierzchni nadległego terenu. Prowadzenie podziemnej eksploatacji kopalin powoduje naruszenie warunków równowagi panującej w górotworze, która wytworzyła się drogą naturalnych procesów geologicznych. Odkształcający się górotwór oddziałuje na powierzchniowe warstwy gruntów. Deformacje terenu wpływają z kolei na zmianę warunków współpracy podłoża górniczego z konstrukcją budowli, w stosunku do stanu poprzedzającego te odkształcenia. Istotną rolę w zminimalizowaniu niekorzystnych oddziaływań podziemnej eksploatacji górniczej na obiekty powierzchniowe odgrywa efektywna działalność profilaktyczno – zapobiegawcza [4,5]. Jednym z istotnych elementów tej działalności jest zastosowanie odpowiednich metod oraz technologii wzmocnień podłoża i liniowych obiektów komunikacyjnych znajdujących się na terenach górniczych [1, 2].

Kolejowe budowle ziemne jako obiekty typowo liniowe są w sposób szczególny narażone na niekorzystne oddziaływanie eksploatacji górniczej. Jednym ze skutecznych sposobów ich zabezpieczenia przed niekorzystnym oddziaływaniem eksploatacji górniczej jest zbrojenie samej budowli oraz jej podłoża odpowiednio dobranymi geosiatkami [6].

Poziome odkształcenia podłoża górniczego $\pm \varepsilon$ powodują, że ośrodek ziarnisty ulega w całej swej masie zagęszczeniu lub rozluźnieniu, a fizykalnie istota tego zjawiska może być stymulowana zmienną wartością współczynnika rozporu bocznego K_{ε}. Zmienność tego współczynnika określa redystrybucję naprężeń głównych σ_{22}/σ_{11} w podłożu.

W referacie przedstawiono rezultaty badań laboratoryjnych, mających na celu określenie zmienności współczynnika rozporu bocznego K_{ε} ośrodka gruntowego zbrojonego oraz niezbrojonego geosiatkami w warunkach wzrostu poziomych odkształceń rozluźniających ε_r oraz wpływu współczynnika rozporu bocznego na redystrybucję składowych stanu naprężenia podłoża w funkcji intensywności poziomych odkształceń rozluźniających ε_r .

2. Program i zakres modelowych badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne przeprowadzono w aparacie wielkowymiarowym A. Rosikonia [8], umożliwiającym symulację odkształceń ε_r . Zakres badań modelowych ośrodka rozdrobnionego symulującego podłoże górnicze w warunkach wzmocnienia oraz braku wzmocnienia geosyntetykiem obejmował lokalną rejestrację naprężeń pionowych i poziomych oraz określenie na ich podstawie wartości współczynnika rozporu bocznego K_s. Badania przeprowadzono dla przypadku podłoża bez wzmocnienia oraz wzmocnionego geosiatką FORTRAC o symbolu R80/30 M. Geosiatka R80/30M charakteryzowała się wytrzymałością doraźną na rozciąganie wzdłuż pasma: \geq 80 kN /m oraz siłą rozciągającą wzdłuż pasma \geq 50 kN/m przy wydłużeniu względnym <3%. Masa powierzchniowa geosiatki wynosiła 450 g/m2. W celu uzyskania odpowiedniej przyczepności ośrodka gruntowego do

geosiatki podścielono ją trzycentymetrową warstwą żwiru. Pomiary wykonano dla stanu geostatycznego, tj. $\varepsilon_r = 0$ mm/m oraz po wymuszeniu poziomych odkształceń rozluźniających podłoża o wartościach: $\varepsilon_r = 1,0 - 5,0$ mm/m (co 1 mm/m) oraz $\varepsilon_r = 7,0$ mm/m, co odpowiadało przedziałowi I-IV kategorii terenu górniczego. Badania wykonywano w trzech seriach pomiarowych. Każda seria dotyczyła pomiarów dla podłoża wzmocnionego i niewzmocnionego geosiatką oraz wymuszeń odkształceń poziomych ε_r od wartości równej 0 do 7 mm/m.

pomiarów dla podróża wżniocnionego i mewzniocnionego geostatką oraz wymuszen odkształceń poziomych ε_r od wartości równej 0 do 7 mm/m. Po wykonaniu jednej serii badań skrzynię opróżniano z piasku a następnie po powrocie do pierwotnego układu ścian skrzyni, odpowiadającego wartości poziomych odkształceń rozluźniających $\varepsilon_r = 0$ mm/m, ponownie umieszczano w niej piasek i zagęszczano warstwami. Wykonanie trzech serii pomiarowych dla każdego modelu wynikało z potrzeby rozpoznania powtarzalności wyników pomiarów oraz sprawdzenia jednorodności stanu wyjściowego.

3. Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze stanowił aparat wielkowymiarowy (rys.1) składający się ze skrzyni o wymiarach 1680 mm x 300 mm x 400 mm, wypełnionej piaskiem, która może być wydłużana równomiernie do wartości $\varepsilon_r = 80$ mm/m, a następnie skracana. Schemat działania aparatu przedstawiono na rys.2 [8].

Skrzynia składa się z segmentów S ustawionych na nakrętkach 7 o odpowiednio dobranych skokach gwintu. Przez nakrętki przechodzą śruby wrzecionowe 2, na końcach których osadzone są koła zębate 4. Śruby wrzecionowe 1 z osadzonymi podobnie kołami zębatymi 3 przechodzą przez nakrętki pomocnicze 8. Koła zębate 4 i 3 połączone zostały między sobą łańcuchami 5. Za pomocą dodatkowego, centralnie ułożonego koła zębatego 6 można równomiernie rozsuwać oraz zsuwać segmenty skrzyni, symulując poziome odkształcenia podłoża, charakterystyczne dla terenu górniczego. Ściany skrzyni wyłożone zostały gumą olejoodporną, pokrytą wazeliną techniczną, na którą nałożono paski folii o wymiarach 50 mm x 200 mm w formie zachodzących na siebie łusek. Dzięki temu piasek może przesuwać się po ścianie w dowolnym kierunku przy współczynniku tarcia równym 0,08 [8].



Rys.1. Aparat wielkowymiarowy do badań laboratoryjnych Fig.1. Multidimensional apparatus for laboratory test



Wykładzina gumowa wyrównuje nieciągłość lokalnych przyrostów długości szkieletu skrzyni złożonego ze sztywnych segmentów. Ściany skrzyni utrzymywane są we właściwym położeniu za pomocą śrub, którymi wywierany jest odpowiedni docisk przez siłomierze. Obok każdej śruby znajduje się czujnik zegarowy mierzący przesunięcie dociskanego punktu. Skrzynię wypełnioną piaskiem obciążono trzema warstwami, nie połączonych ze sobą kostek ołowianych symulujących dodatkowe naprężenia normalne od ciężaru nawierzchni na całej górnej powierzchni warstwy o intensywności $\approx 0,01$ MPa .

W przypadku określania wartości naprężeń w gruncie zbrojonym geosyntetyk umieszczony był na głębokości równej około 2/3 wysokości skrzyni, licząc od góry aparatu badawczego. Do pomiarów wykorzystano sześć cylindrycznych czujników tensometrycznych, które umieszczono parami w skrzyni aparatu zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.3.



Rys.3. Schemat rozmieszczenia czujników w aparacie badawczym Fig.3. Scheme of sensors' placement in the test apparatus

Poszczególne pary czujników rozmieszczono odpowiednio na głębokości równej około: ¹/4, ¹/₂ oraz ³/₄ wysokości skrzyni, symetrycznie względem jej długości i szerokości. Czujniki wykonane zostały w formie aluminiowych cienkościennych walców na bocznych ściankach których, (tworzące walca), naklejonych zostało po sześć tensometrów oporowych. Schemat czujnika przedstawiono na rys.4.

W celu równoczesnego określenia wartości naprężeń poziomych i pionowych w badanym punkcie (poziomie) czujniki usytuowano parami, prostopadle względem siebie.

Pomiary wykonano za pośrednictwem mostka tensometrycznego MTS-10. Mostek tensometryczny MTS-10 jest przyrządem rejestrującym wyniki pomiarów w sześciu punktach, jednocześnie współpracującym z tensometrami oporowymi o oporności w zakresie 100 \div 1000 Ω . Techniczna niedokładność pomiarowa mostka jest mniejsza od 1 %. Mostek umożliwiał automatyczną rejestrację wyników po podłączeniu do komputera. Układ pomiarowy, tj. mostek tensometryczny MTS-10 wraz z czujnikiem przedstawiono na rys.5.

108







Rys.5. Mostek tensometryczny MTS-10 wraz z czujnikiem Fig.5. Tensometric bridge MTS-10 with sensor

4. Przygotowanie i technika prowadzenia badań

Przed każdym cyklem pomiarowym skrzynia była opróżniana, a następnie zasypywana warstwowo mieszaniną piasku drobnoziarnistego o grubości 10 cm. Każda warstwa była zagęszczona ubijakami ręcznymi po uprzednim nawilgoceniu mieszaniny piasku do wartości W_{opt} . Kąt tarcia wewnętrznego tak przygotowanej mieszanki wynosił $\phi \approx 35^{\circ}$.

Podczas zagęszczania mieszanki piasku dążono do uzyskania wstępnej prekonsolidacji poprzez doprowadzenie wyjściowego współczynnika rozporu bocznego K₀ do wartości równej lub większej od 1, co odpowiada przypadkowi eksploatowania nawierzchni na prekonsolidowanym podłożu, gdy naprężenia poziome są większe (równe) od pionowych. Nie zawsze z przyczyn technicznych możliwe było uzyskanie współczynnika K₀ \geq 1.

Szczególną uwagę poświęcano starannemu usytuowaniu czujników w aparacie badawczym zarówno pod względem prawidłowego ich rozmieszczenia na odpowiedniej głębokości w skrzyni, jak również pod względem prostopadłego usytuowania cylindrycznych czujników względem siebie. Po przygotowaniu stanowiska i umieszczeniu w ośrodku gruntowym czujników oraz po zarejestrowaniu odczytów wyjściowych na czujnikach przesuwu ścianek bocznych aparatu przystępowano do zasadniczej części eksperymentu.

Po podłączeniu czujników tensometrycznych do mostka MTS-10 rozpoczynano pomiary, dla każdej z etapowych wartości odkształceń poziomych skrzyni, od 0 do 7 mm/m, po okresie czasu równym: 0; 1; 2; 3 oraz 7 godzin w celu oceny stopnia stabilizacji odczytu. Odczyty odpowiadające kolejnym etapom przemieszczeń poziomych wykonywano po uprzednim zatrzymaniu przesuwu ścianek aparatu. Stwierdzono, że po okresie ~3 godzin od momentu zakończenia kolejnego etapu odkształcenia rejestrowane wartości pomiarów stabilizowały się na wszystkich poziomach.

Wykonany po 7 godzinach pomiar końcowy wynikał z konieczności dokładnego sprawdzenia, czy nastąpiła pełna stabilizacja odczytów.

Przesuw ruchomych ścianek aparatu realizowano poprzez powolny, równomierny obrót urządzenia napędowego. Kolejne przemieszczenia ścianek aparatu badawczego o wartościach odpowiadających poziomym odkształceniom rozluźniającym $\varepsilon_r = 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0$ i 7,0 mm/m mierzono zegarowymi czujnikami przesuwu umiejscowionymi w górnej i dolnej części ścianek.

5. Wyniki badań i ich analiza

Na podstawie uzyskanych wartości naprężeń [7] obliczono wartości współczynnika rozporu bocznego K_e odpowiadające danej wartości poziomego odkształcenia rozluźniającego ϵ_r , a następnie sporządzono charakterystyki zmienności współczynnika rozporu bocznego K_e ośrodka gruntowego zbrojonego oraz niezbrojonego geosiatkami w warunkach wzrostu poziomych odkształceń rozluźniających ϵ_r .

Na rysunkach 6 – 11 przedstawiono graficznie zależność współczynnika rozporu bocznego K_{ε} od wartości poziomych odkształceń rozluźniających ε_r , odpowiednio dla:

- podłoża niewzmocnionego i numerów par czujników 1H/V, 2H/V, 3H/V (rys.6 –8) oraz
- wzmocnionego geosiatką dla czujników nr 1, 2 i 3 (rys.9–11).

Weryfikacja doświadczalna wzmocnionego



- Rys.6. Zależność współczynnika rozporu bocznego K_s od wartości poziomych odkształceń rozluźniających ε_r (ośrodek bez zbrojenia -para czujników nr 1^{H/V})
- Fig.6. Relation between side strut coefficient K ε and values of horizontal loosening strains ε r (place without reinforcement a couple of sensors no 1^{HV})



Odkształcenia rozluźniające Er [mm/m]

- Rys.7. Zależność współczynnika rozporu bocznego Ke od wartości poziomych odkształceń rozluźniających er (ośrodek bez zbrojenia – para czujników nr 2^{H/V})
- Fig.7. Relation between side strut coefficient K ϵ and values of horizontal loosening strains ϵr (place without reinforcement a couple of sensors no $2^{H/V}$)



- Rys.8. Zależność współczynnika rozporu bocznego Ke od wartości poziomych odkształceń rozluźniających er (ośrodek bez zbrojenia -para czujników nr 3^{H/V})
- Fig.8. Relation between side strut coefficient Ke and values of horizontal loosening strains er (place without reinforcement a couple of sensors no 3^{H/V})



Odkształcenia rozłuźniające Er [mm/m]

- Rys.9. Zależność współczynnika rozporu bocznego Ke od wartości poziomych odkształceń rozluźniających er (ośrodek zbrojony geosiatką -para czujników nr 1^{H/V})
- Fig.9. Relation between side strut coefficient KE and values of horizontal loosening strains Er (place reinforced with geo-membrane a couple of sensors no 1^{H/V})

Weryfikacja doświadczalna wzmocnionego



- Rys.10. Zależność współczynnika rozporu bocznego Kε od wartości poziomych odkształceń rozluźniających εr (ośrodek zbrojony geosiatką -para czujników nr 2^{HV})
- Fig. 10. Relation between side strut coefficient Ke and values of horizontal loosening strains er (place reinforced with geo-membrane- a couple of sensors no 2^{H/V})



Odkształcenia rozluźniające Er[mm/m]

- Rys.11.Zależność współczynnika rozporu bocznego Ke od wartości poziomych odkształceń rozluźniających er (ośrodek zbrojony geosiatką – para czujników nr 3^{HV})
- Fig. 11. Relation between side strut coefficient Kɛ and values of horizontal loosening strains ɛr (place reinforced with geo-membrane a couple of sensors no 3^{H/V})

Na wykresach zaznaczono graniczną wartość współczynnika rozporu bocznego K_{min}, dla którego nastąpi utrata nośności przez podłoże gruntowe.

Teoretycznie krytyczna, minimalna wartość współczynnika rozporu bocznego K_{min} , po przekroczeniu której nastąpi utrata nośności podłoża, dla mieszanki piasku drobnego średnio zagęszczonego o kącie tarcia wewnętrznego $\phi = 35^{\circ}$ wynosiła:

$$K_{\min} = \frac{\sigma_{22}^{(\min)s}}{\sigma_{11}} = tg^2 \cdot \left(\frac{\Pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) = tg^2 \left(27^{\circ}30^{\circ}\right) = 0,267$$
(1)

Dokonując analizy otrzymanych wyników można zauważyć, iż przekroczenie stanu równowagi granicznej w przypadku braku wzmocnienia warstw modelowanej nawierzchni następuje już dla wartości poziomych odkształceń rozluźniających $\varepsilon_r = 2,0 - 3,0$ mm/m (rys. 6–8), co w praktyce odpowiada I/II kategorii terenu górniczego. Zastosowanie wzmocnienia w postaci geosiatki spowodowało przesunięcie krytycznej wartości poziomych odkształceń rozluźniających, przy których nastąpi przekroczenie stanu równowagi granicznej, do wartości $\varepsilon_r \ge 5,0$ mm/m dla stref modelu usytuowanych powyżej warstwy geosyntetyku (rys.9 i 10). Należy równocześnie zauważyć, że dla przypowierzchniowych warstw grunt sypki nie osiąga stanu granicznego nawet dla $\varepsilon_r = 7,0$ mm/m (rys.9). Zbrojenie ograniczyło redukcję naprężeń poziomych, która to redukcja jest konsekwencją mobilizacji poziomych odkształceń rozluźniających ε_r górniczego podłoża gruntowego. Rezultatem ograniczenia stopnia redukcji naprężeń poziomych w warstwach nad geosyntetykiem jest znacznie mniejszy spadek wartości współczynnika rozporu bocznego gruntu K_ε, którego wartość decyduje o osiągnięciu przez ośrodek stanu równowagi granicznej.



- Rys.12. Wersyfikacja doświadczalna stanu granicznego w warunkach odkształceńrozluźniających ε_r na poziomie czujników nr 1^{Hν} (ośrodek: niewzmocniony – linia przerywana, wzmocniony geosiatką – linia ciągła)
- Fig. 12. Experimental verification of extreme state due to loosening strains ε_r on the level of sensors no 1^{H/V} (place: not strengthened dashed line, strengthened with geo-membrane– solid line)

Weryfikacja doświadczalna wzmocnionego ...



- Rys.13. Weryfikacja doświadczalna stanu granicznego w warunkach odkształceń rozluźniających ε_r na poziomie czujników nr 2^{HV} (ośrodek: niewzmocniony – linia przerywana, wzmocniony geosiatką – linia ciągła)
- Fig.13. Experimental verification of extreme state due to loosening strains ε, on the level of sensors no 2^{H/V} (place: not strengthened – dashed line, strengthened with geo-membrane – solid line)



- Rys.14. Weryfikacja doświadczalna stanu granicznego w warunkach odkształceń rozluźniających ε_r na poziomie czujników nr 3^{HV} (ośrodek: niewzmocniony – linia przerywana, wzmocniony geosiatką – linia ciągła)
- Fig.14. Experimental verification of extreme state due to loosening strains ε_r on the level of sensors no 3^{HV} (place: not strengthened dashed line, strengthened solid line)

Na podstawie uzyskanych wartości naprężeń poziomych σ_{22} i pionowych σ_{11} sprawdzono stan graniczny nośności ośrodka niewzmocnionego oraz wzmocnionego alternatywnie geosiatką lub geotekstylem z warunku Coulomba – Mohra dla kolejnych wartości poziomych odkształceń rozluźniających ϵ_r .

Sprawdzenie warunku nośności granicznej przedstawiono dla ośrodka gruntowego niewzmocnionego oraz zbrojonego geosiatką i odpowiednio poziomu czujników nr 1, 2 i 3 na rys:12, 13 oraz 14. Analiza wyników przeprowadzona z wykorzystaniem warunku granicznego Coulomba – Mohra potwierdziła dużą skuteczność zbrojenia gruntu geosiatkami.

6. Podsumowanie

Reasumując można stwierdzić, że przeprowadzone badania potwierdziły istotny wpływ wzmocnienia górniczego podłoża gruntowego geosyntetykiem na rozkład składowych stanu naprężenia, a tym samym na możliwość redukcji zjawisk prowadzących do osiągnięcia przez podłoże kolejowej budowli ziemnej stanu równowagi granicznej. Dowodzi to, iż geosiatki są skutecznym elementem wzmocnienia podłoża kolejowej budowli ziemnej poddanej oddziaływaniu poziomych odkształceń rozluźniających ε_r .

Istotną cechą uzyskanych wyników jest zaobserwowana dość dobra powtarzalność otrzymanych wartości naprężeń oraz współczynnika rozporu bocznego K_ε dla kolejnych serii pomiarowych wykonanych dla identycznych modeli oraz wielkości poziomych odkształceń rozluźniających ε_r .

Literatura

- 1. Ajdukiewicz J.: Projektowanie z geosyntetykami. Magazyn "Autostrady", nr 5i 6/2004.
- 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
- Alenowicz J., Gołos M.: "Projektowanie wzmocnień podbudów z kruszyw geosiatkami TENSAR na słabym podłożu". Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej, Lublin 1998
- 4. Kłosek K.: "Earthen structures in mining areas". Proceeding of the 12th National Meeteng of the ASSMR. Gillette, WY, USA, June 5 8, 1995: 495 501
- Kłosek K.: "Use of geosynthetics for strengthening road surface and subbase in areas with he mining activity". Proc. Of the Int. Syp. On " Earth Reinforcement", vol. I, Fukuoka, Japan, Ed. – Balkema, Rotterdam, 1996: 609 – 614
- Kłosek K. Ajdukiewicz J.: Efektywność stosowania geosyntetyków w budownictwie komunikacyjnym. Mat Konf. Naukowo-Technicznej pt: 'Szkoła metod projektowania obiektów inżynierskich z zastosowaniem geotekstyliów', Ustroń, 2004-11-14
- Kotasiński M.: Stan naprężenia i odkształcenia w nawierzchniach drogowych modyfikowanych geosyntetykami terenach górniczych. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska 2004
- Rosikoń A.: Budownictwo komunikacyjne na terenach objętych szkodami górniczymi. WKiŁ, Warszawa 1979