

ANALIZA WARUNKÓW STATECZNOŚCI NASYPU AUTOSTRADY A-4 MIĘDZY WĘZŁAMI „WIREK” – „BATOREGO”

Marek Cata*, Jerzy Cieślik*, Jerzy Flisiak*, Michał Kowalski*

1. Wprowadzenie

Po zakończeniu budowy odcinek autostrady A-4, zlokalizowany na wysokim nasypie w km 330+700 ÷ 331+200, uległ we wrześniu 2004 roku uszkodzeniu. Zaobserwowano wówczas [21] wystąpienie szeregu deformacji nieciągłych o charakterze pęknięć i szczelin, o rozwartości dochodzącej do kilku centymetrów. Deformacje te wystąpiły zarówno na jezdniach autostrady jak i w pasie rozdziału. Pęknięcia i szczeliny usytuowane były w większości równoległe do osi autostrady.

W rejonie awarii, od maja 2004 roku, na głębokości 540 m, prowadzona była przez kopalnię „Polska-Wirek” eksploatacja ściany 4c o wysokości ok. 2,0 m [2, 26].

Wyjaśnienie rzeczywistych przyczyn wystąpienia awarii jest sprawą bardzo skomplikowaną. Przyczynami awarii mogą być bowiem błędy popełnione w całym procesie inwestycyjnym, począwszy od rozpoznania geotechnicznego, poprzez projekt nasypu oraz jego wykonawstwo.

Autorzy licznych ekspertyz, wykonanych po wystąpieniu awarii, z reguły nie biorą pod uwagę możliwości popełnienia błędów na etapie projektowania i realizacji inwestycji, zakładając *a priori*, że jedyną przyczyną uszkodzenia nasypu były deformacje wywołane eksploatacją ściany 4c [10, 11, 13, 21]. Autorzy pracy [11] stwierdzają wręcz, że „*Inne wpływy pozagórniczne, mogące stanowić potencjalne przyczyny awarii zostały wykluczone w drodze szczegółowej ich analizy*”.

Stwierdzenie takie budzi szereg wątpliwości, ponieważ:

- do analizy stateczności nasypu zastosowano metodę Taylora. Stosowanie metody Taylora prowadzić może do dużych błędów prognozy, co stwierdza między innymi Glazer [8, s. 302]: „*Metoda Taylora ze względu na łatwość obliczeń jest często i chętnie stosowana, i to nawet wtedy, gdy nie powinno się jej stosować. Dlatego też z naciskiem należy podkreślić, że jest to metoda opracowana dla gruntów jednorodnych spoistych. Próby stosowania jej do innych warunków mogą mieć bardzo groźne skutki i dlatego też nie powinny być podejmowane. Obecnie nawet dla zbroczy zbudowanych z gruntów spoistych powinno się stosować inne metody obliczeń, traktując metodę Taylora jedynie jako dającą wyniki orientacyjne.*” Poza tym metoda ta nie uwzględnia:

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki

- nachylenia podłoża (w rejonie awarii nachylenie to wynosiło ok. 10%),
 - własności podłoża (w podłożu występują grunty słabe),
 - zastosowania materaca wzmacniającego na kontakcie podłoża – nasyp,
 - obciążenia naziomu (Rozporządzenie [19] zaleca, aby przy analizie stateczności uwzględniać obciążenie naziomu o wartości 25 kPa),
 - deformacji II kategorii, na przeniesienie których powinien być zabezpieczony nasyp.
- do obliczeń przyjęto bardzo wysokie wartości parametrów wytrzymałościowych nasypu (ką tarcia wewnętrznego $\varphi = 26^\circ$, spójność $c = 67$ kPa). Przyjęcie do obliczeń, na podstawie badań w średniowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania [15], bardzo dużej wartości spójności budzi poważne wątpliwości, ponieważ jest ona prawdopodobnie spowodowana zjawiskiem klinowania się grubych ziarn. Wysokiej spójności gruntów z natury niespoistych, uzyskiwanej z takich badań, nie powinno uwzględniać się w analizach stateczności [2, 16].
- zastosowana w pracy [10] *analiza możliwości poślizgu nasypu po nachylonym podłożu* nie uwzględnia rzeczywistych warunków współpracy nasypu z podłożem. Zakłada się w niej, że nasyp jest ciałem sztywnym, spoczywającym na nieodkształcalnym podłożu nachylonym. W rzeczywistości zarówno nasyp jak i podłoże są współpracującymi ośrodkami odkształcalnymi o określonej wytrzymałości.

Reasumując można stwierdzić, że przyjęta w pracach [10, 11] metodyka analizy stateczności, polegająca na niezależnej ocenie wpływu różnych czynników na warunki pracy nasypu i podłoża jest niedokładna a wyciągane na jej podstawie wnioski są zbyt pochopne. Nie można bowiem na podstawie oceny wpływu poszczególnych czynników na przebieg procesu formułować wniosku, że jeżeli żaden z nich nie jest przyczyną powstania procesu to jego zajście jest niemożliwe.

Podstawowym celem pracy było sprawdzenie, czy inne, nie związane z górnictwem czynniki mogły przyczynić się do powstania awarii. W referacie zamieszczono wyniki analizy stateczności nasypu w rejonie awarii, przeprowadzonej metodami równowagi granicznej (program SLOPE/W) oraz metodą różnic skończonych (program FLAC).

2. Założenia do obliczeń

Analizę stateczności przeprowadzono w przekroju prostopadłym do osi autostrady [2, rys. 1]. W przekroju tym wysokość skarpy północnej (lewa strona modelu) wynosi 10,4 m a skarpy południowej (strona prawa) 4,3 m. Nachylenie skarp nasypu jest jednakowe i wynosi 1:1,5. Zgodnie z projektem [25] przyjęto, że podłoże o grubości 6 m i nachyleniu 10%, spoczywa na skalnych utworach karbońskich, o bardzo dużej wytrzymałości, w porównaniu z utworami gruntowymi. Dla przeprowadzenia obliczeń zbudowano model przedstawiony na rysunkach 1 i 2 o szerokości podstawy równej 120 m, wysokości z lewej strony 11,9 m, z prawej strony 23,8 m (rys. 2).

Obliczenia przeprowadzono dla czterech wariantów, różniących się od siebie przyjmowanymi wartościami parametrów wytrzymałościowych podłoża i nasypu. W wariantach W1, W2 i W3 przyjęto wartości parametrów wytrzymałościowych nasypu określone w projekcie, natomiast w wariantcie W4 zawyżone, naszym zdaniem, wartości parametrów stosowane w pracach [10, 11].

Poszczególne warianty różniły się również budową geologiczną podłoża. Podobnie jak w pracy [2] założono w nich, że podłoże nasypu stanowi:

- wariant W1 – plastyczna glina pylasta,
- wariant W2 – twardoplastyczna glina pylasta,
- wariant W3 – od strony skarpy północnej twardoplastyczna glina pylasta wzmocniona poprzez zastosowanie iniekcji wysokociśnieniowej *jet grouting* o parametrach ekwiwalentnych (zgodnie z zaleceniami projektowymi [25]); w pozostałej części twardoplastyczna glina pylasta,
- wariant W4 – podłoże i nasyp o parametrach przyjętych w pracach [10, 11].

Wartości parametrów wytrzymałościowych gruntów podłoża określono na podstawie wyników badań geotechnicznych, omówionych w projekcie [25].

Przyjęto, że materac zbudowany jest z żużla wielkopieczowego.

Przyjmowane do obliczeń wartości fizyko-mechaniczne zestawiono w tabeli 1.

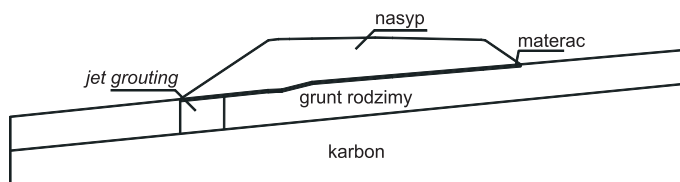
Tabela 1. Parametry materiałów przyjęte do obliczeń

Wariant obliczeń	Warstwa	γ [kN/m ³]	E [MPa]	ν [-]	c [kPa]	Φ [°]	Współczynnik tarcia kontaktu μ
W1	Nasyp	20,000	60	0,25	18,000	25,00	0,37
	Materac	16,000	60	0,25	60,790	45,80	0,82
	Podłoże	20,500	25	0,30	11,000	12,00	0,35
W2	Nasyp	20,000	60	0,25	18,000	25,00	0,37
	Materac	16,000	60	0,25	60,790	45,80	0,82
	Podłoże	20,700	30	0,25	15,000	14,00	0,35
W3 (W2 + <i>jet grouting</i>)	Nasyp	20,000	60	0,25	18,000	25,00	0,37
	Materac	16,000	60	0,25	60,790	45,80	0,82
	Podłoże I	20,700	30	0,25	15,000	14,00	0,35
	Podłoże II	20,775	30	0,25	22,707	15,73	0,35
W4 parametry przyjmowane w pracach [10, 11]	Nasyp	20,000	60	0,20	67,000	26,00	0,39
	Materac	16,000	120	0,20	100,000	30,00	0,46
	Podłoże	20,700	60	0,30	30,000	20,00	0,35

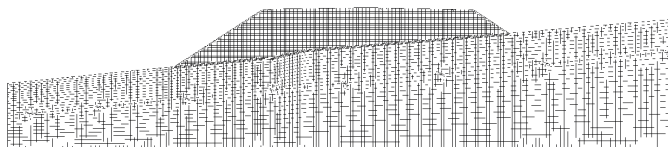
Analizę stateczności nasypów przeprowadzono przy zastosowaniu dwóch programów:

- programu metody różnic skończonych FLAC, w którym wykorzystano metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie [3, 4, 5, 6, 14],
- programu SLOPE/W z pakietu GeoStudio 2004, wykorzystującego do obliczeń metody równowagi granicznej, przy użyciu którego przeprowadzono obliczenia metodami Bishopa oraz Janbu.

Obliczenia metodą różnic skończonych wykonano przy założeniu płaskiego stanu odkształcenia. Dla wszystkich wymienionych warstw geologicznych obiektu w obliczeniach przyjęto ten sam idealnie sprężysto-plastyczny model fizyczny, z liniowym warunkiem plastyczności Coulomba–Mohra. Parametry modelu fizycznego przyjęto według tabeli 1. Założono, że pomiędzy podłożem a nasypem wykonany został zamknięty materac o grubości 36 cm z żużla wielkopieczowego, ograniczony geosiatką o wytrzymałości na jednoosiowe rozciąganie odpowiednio, dolna część 40 kN/m i górna część 20 kN/m.



Rys. 1. Geometria modelu obliczeniowego



Rys. 2. Dyskretyzacja modelu obliczeniowego

Do modelowania geosiatki zastosowano elementy prętowe, nie przenoszące naprężeń ściskających. Parametry elementów prętowych wyznaczono na podstawie danych technicznych geosiatek typu LBO 220 SAMP oraz LBO 440 SAMP firmy Tenax. Ze względu na brak polskiej normy dotyczącej ustalania wytrzymałości długoterminowej wyrobu geosyntetycznego, w obliczeniach przyjęto długoterminową wytrzymałość geosiatki na rozciąganie odpowiadającą sile występującej w geosiatce przy wydłużeniu względnym 2% z próby jednoosiowego rozciągania (14 kN/m geosiatka dolna i 7 kN/m geosiatka górna), co odpowiada współczynnikowi bezpieczeństwa rzędu 2,9. Wydaje się, iż są to wartości i tak zawyżone, gdyż na stronie producenta podano przykład nasypu drogowego w Bangkoku, gdzie użyto podobnych geosiatek (LBO 302 SAMP) przy zastosowaniu współczynnika bezpieczeństwa o wartości 4. Podobne, wysokie współczynniki bezpieczeństwa dla geosiatek z polipropylenu zaleca norma brytyjska BS 8006 [1].

Podobnie jak w pracy [2] w obliczeniach założono, że kontakt pomiędzy geosiatką, podłożem, materacem, oraz nasypem odbywa się według prawa tarcia typu Coulomba. Wartość kąta tarcia (bądź współczynnika tarcia) przyjmowana w tego typu obliczeniach zawsze jest dyskusyjna i przyjmowana różnie przez różnych autorów. Najczęściej wartość kąta tarcia pomiędzy geosiatką a gruntem wyznacza się wykorzystując wartość kąta tarcia wewnętrznego gruntu według formuły:

$$\varphi_i = \arctg (F \cdot \tg \varphi_s) \quad (1)$$

gdzie: φ_i – kąt tarcia na kontakcie,
 φ_s – kąt tarcia wewnętrznego gruntu,
 F – współczynnik redukcyjny.

Podstawą do wyznaczenia współczynnika tarcia mogą również być wyniki badań laboratoryjnych lub polowych tzw. testu *pull-out*, czyli wrywania geosiatki z gruntu poddanego różnego rodzaju obciążeniom.

Współczynnik tarcia wyznaczano dwuetapowo. W pierwszym etapie dla wybranego kontaktu wyliczano wartość współczynnika wynikającą z zależności (1), przyjmując $F = 0,8$.

Jeżeli wartość tego współczynnika była mniejsza od $\mu = 0,35$ (najniższej wartości uzyskanej w teście *pull-out*) do obliczeń przyjmowano wartość $\mu = 0,35$. Jeżeli zaś wartość wyliczonego z zależności (1) współczynnika była większa od $\mu = 0,35$, to wtedy do obliczeń przyjmowano wartość wynikającą z zależności (1). Uzyskane w ten sposób wartości współczynników wydają się być nieco zawyżone, szczególnie dla gruntów słabych, o małym kącie tarcia wewnętrznego. Wartości współczynników dla odpowiednich kontaktów modelu obliczeniowego zamieszczono w tabeli 1.

Dla obliczeń programem SLOPE/W zbudowano model o wymiarach i parametrach gruntowych identycznych jak w obliczeniach numerycznych. Do modelowania geosiatki zastosowano elementy typu Fabric, o wytrzymałości długoterminowej na rozciąganie odpowiednio 14 kN/m geosiatka dolna i 7 kN/m geosiatka górna.

Analizę stateczności przeprowadzono bez uwzględniania wpływów deformacji górniczych. Obliczenia MRS przeprowadzono w dwóch wariantach:

1. bez obciążenia korony nasypu,
2. z równomiernie rozłożonym obciążeniem korony nasypu, wynoszącym 25 kPa (obciążenie ruchowe autostrady zgodne z [19]).

Dla wariantu W3, zakładającego wzmocnienie podłoża iniekcją *jet grouting*, przeprowadzono dodatkowe obliczenia, w których założono, że:

1. Na skutek eksploatacji pierwotne nachylenie podłoża zwiększa się o 10,0 mm/m (wartość nachyleń określona w pracach [10, 21]).
2. W podłożu nie zastosowano wzmocnienia przy wykorzystaniu materaca i geosiatek.

Celem tych obliczeń było sprawdzenie wpływu stosowania zbrojenia na warunki stateczności, ocena skuteczności zastosowanych zabezpieczeń, oraz sprawdzenie, czy wykazywane pomiarami nachylenia na skutek eksploatacji mają wpływ na stateczność nasypu.

3. Omówienie wyników obliczeń

Ze względu na ograniczoną objętość pracy, szczegółowo omówiono jedynie wyniki obliczeń uzyskane dla wariantu W3, który, jak się wydaje, najlepiej odzwierciedla warunki panujące w rejonie uszkodzonego nasypu autostrady A-4. Dla wariantów W1 i W2 i W4 ograniczono się do omówienia ogólnego.

Wariant W1

W wariacie W1 przyjęto, że w podłożu znajduje się glina pylasta w stanie plastycznym, o stosunkowo niskich parametrach wytrzymałościowych (tabela 1). Z przeprowadzonych obliczeń dla tego wariantu wynika, że nasyp znajduje się praktycznie w stanie zbliżonym do granicznego. Wartości wskaźników stateczności dla nasypu nieobciążonego zawarte są w przedziale od 1,062 wg metody Janbu do 1,165 wg metody Bishopa i są znacznie niższe od wymaganych odpowiednimi przepisami (rozporządzenie [19] podaje, że dla ziemnych budowli drogowych wskaźnik stateczności skarp musi być większy od 1,5). Obliczenia MRS wskazują, że po uwzględnieniu obciążenia eksploatacyjnego nasypu o wartości 25 kN/m wskaźnik stateczności spada do wartości 1,06 (stan graniczny).

Wariant W2

W wariantcie W2 przyjęto, że w podłożu znajduje się glina pylasta w stanie twar doplastycznym, o parametrach wytrzymałościowych wyższych niż w wariantcie 1 (tabela 1). W tym wariantcie obserwuje się wzrost wskaźników stateczności w porównaniu do wariantu W1. Uzyskane wg różnych metod analizy wartości wskaźników stateczności zawarte są w przedziale od 1,224 do 1,355. Zgodnie ze stosowaną w budownictwie drogowym klasyfikacją [12] można więc przyjąć, że powstanie procesów osuwiskowych jest prawdopodobne, a uzyskane wartości wskaźników są znacznie niższe od wymaganych odpowiednimi przepisami.

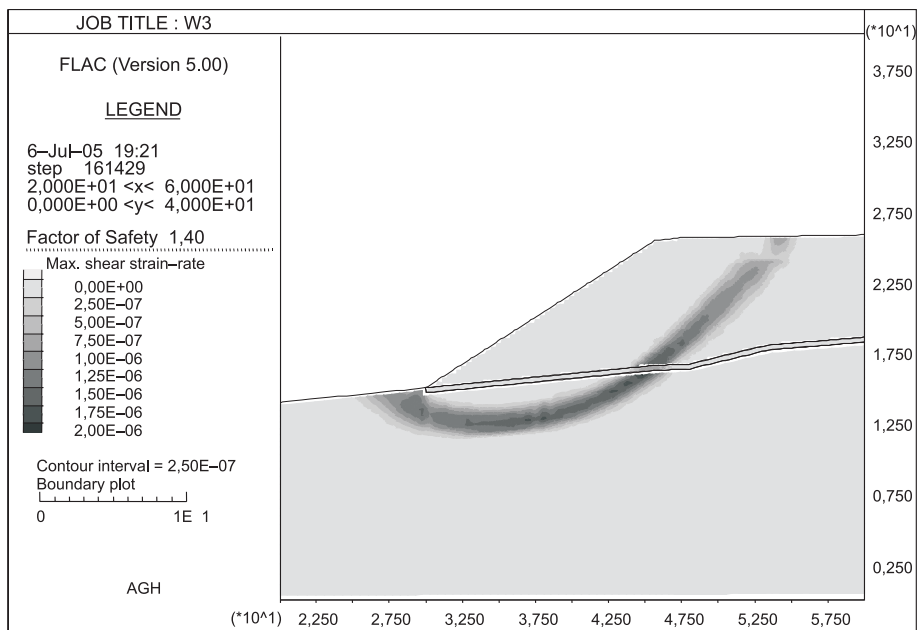
Wariant W3

Wariant ten stanowi modyfikację wariantu W2, polegającą na dodaniu pod północną (wyższą) skarpią nasypu regionu wzmocnionego poprzez wykonanie pali *jet-grouting*. Dla uwzględnienia wzmocnienia w analizie stateczności zastosowano ekwiwalentne wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu dla wzmocnionej warstwy geotechnicznej. Przyjęto, że region wzmocnienia obejmuje strefę od podstawy nasypu do podłoża karbońskiego a jego szerokość wynosi 8 m (połowa długości rzutu północnej skarpy na płaszczyznę poziomą).

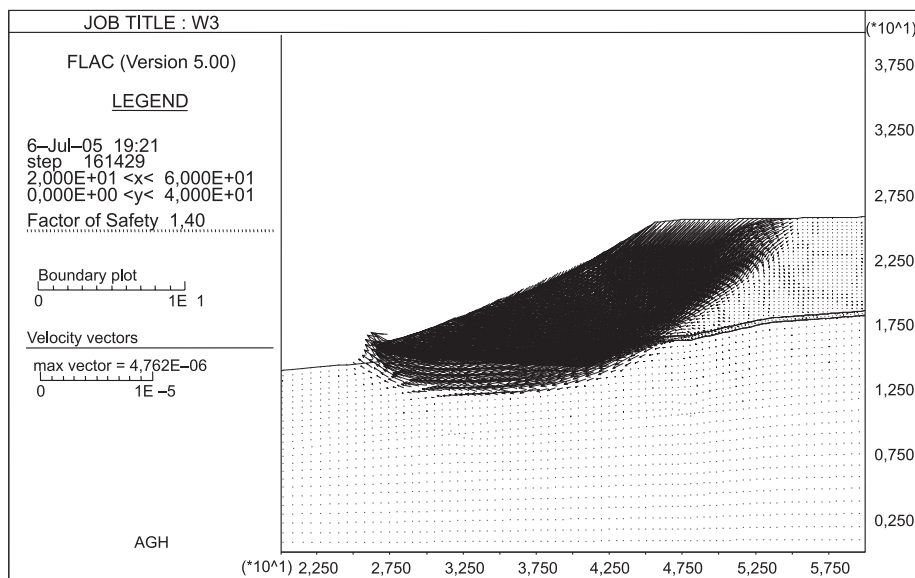
Wyniki obliczeń dla wariantu W3 bez obciążenia naziomu, uzyskane z programu FLAC w postaci map:

- przyrostów odkształceń postaciowych,
- wektorów prędkości,
- odkształceń postaciowych,

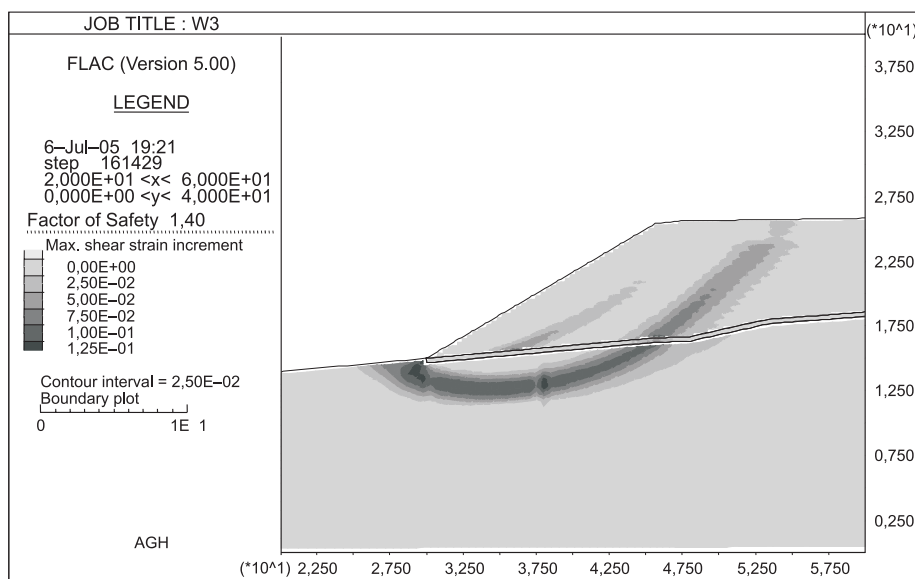
przedstawiono na rysunkach od 3 do 5.



Rys. 3. Mapa przyrostów odkształceń postaciowych dla wariantu W3



Rys. 4. Wektory prędkości dla wariantu W3



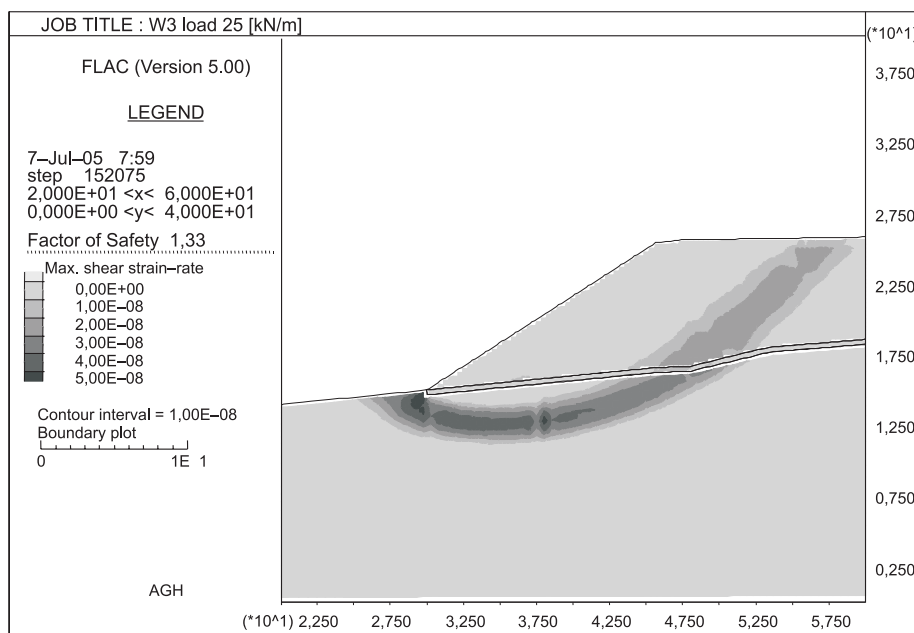
Rys. 5. Mapa odkształceń postaciowych dla wariantu W3

Dla przypadku tego minimalna wartość wskaźnika stateczności wynosi 1,4, a więc jest niższa od wymaganej dla budowli drogowych. Powierzchnia poślizgu w tym wariantcie przebiega głębiej w korpusie nasypu niż w wariantcie W2, tworząc większą potencjalną bryłę osuwiskową. Z rysunku 5 wynika, że oprócz powierzchni poślizgu przebiegającej poniżej dolnej

krawędzi skarpy, wyraźnie widoczna jest druga, potencjalna powierzchnia wskazująca na możliwość poślizgu nasypu po powierzchni materaca. Można więc przypuszczać, że przy mniejszej wartości tarcia na kontakcie grunt–geosyntetyk (do obliczeń przyjęto bardzo wysokie wartości współczynnika tarcia) potencjalny poślizg nasypu po materacu byłby dominującym sposobem utraty stateczności.

Z obliczeń metodami równowagi granicznej uzyskano zbliżone wartości wskaźników stateczności: dla metody Janbu 1,303 a dla metody Bishopa 1,455.

Obciążenie korony nasypu o wartości 25 kPa (rys. 6) powoduje niewielkie zmniejszenie wskaźnika stateczności do wartości 1,33.



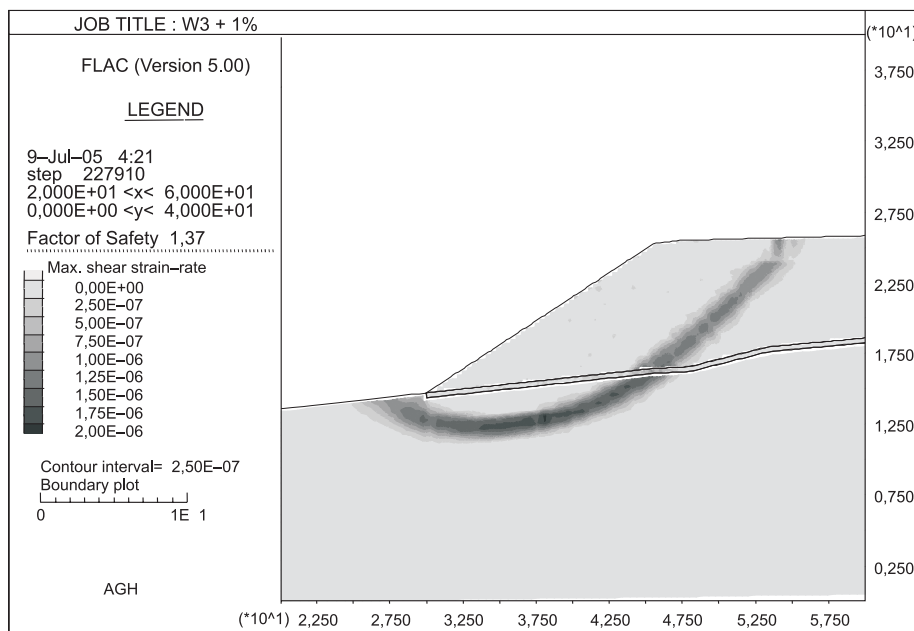
Rys. 6. Mapa przyrostów odkształceń postaciowych dla wariantu W3 z uwzględnieniem obciążenia korony nasypu

Dla wariantu W3 przeprowadzono dodatkowe obliczenia, których celem było sprawdzenie, w jakim stopniu wzrost nachylenia podłoża, wywołany na przykład eksploatacją podziemną, wpływa na warunki stateczności (wariant W3a). W obliczeniach, które ilustruje rysunek 7 założono, że nachylenie podłoża zwiększyło się o 10 mm/m (1%), czyli o wartość maksymalną dla III kategorii terenów górniczych. Zwiększenie pierwotnego nachylenia podłoża o 10 mm/m spowodowało niewielkie zmniejszenie wskaźnika stateczności do wartości 1,37 (spadek o 2,1%).

Podobne wyniki uzyskano przy zastosowaniu metod równowagi granicznej. Wg metody Bishopa zwiększenie nachylenia o 10 mm/m powoduje spadek wskaźnika stateczności do wartości 1,418 (spadek o 2,5%), a wg metody Janbu do wartości 1,271 (spadek o 2,45%).

Można więc stwierdzić, że dodatkowe nachylenia wywołane deformacjami na skutek eksploatacji, nie wpływają w istotny sposób na warunki stateczności nasypu. Jest to potwier-

dzenie znanego powszechnie faktu, że duże wartości nachyleń wywołanych eksploatacją stwarzają duże zagrożenie dla stateczności obiektów wysokich o dużej smukłości, a małe dla obiektów o dużych wymiarach i niewielkiej smukłości, do których zaliczają się nasypy drogowe.



Rys. 7. Mapa przyrostów odkształceń postaciowych dla wariantu W3 z uwzględnieniem dodatkowego 1% nachylenia podłoża (wariant W3a)

Dla modelu W3 przeprowadzono również obliczenia, których celem było sprawdzenie skuteczności zastosowanego materaca wzmacniającego podłoża.

Rozważono dwa dodatkowe warianty:

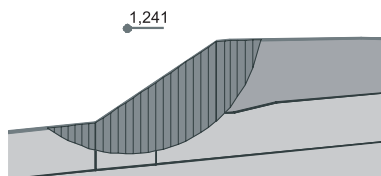
- 1) (wariant W3b), w którym założono, że materac nie został wykonany,
- 2) (wariant W3c), w którym założono, że do wykonania materaca wykorzystano geosiatki o długotrwałej wytrzymałości na rozciąganie 200 kPa/m.

Z obliczeń dla wariantu W3b (rys. 8), uzyskano następujące wartości wskaźników stateczności:

dla metody MRS – 1,36 (zmniejszenie o 2,9%),

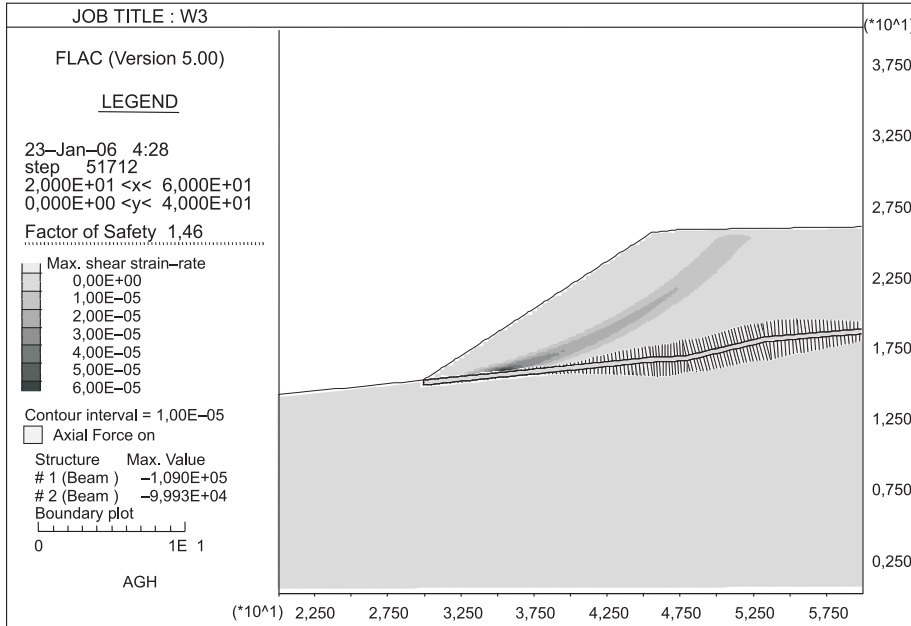
dla metody Bishopa – 1,384 (zmniejszenie o 4,9%),

dla metody Janbu – 1,241 (zmniejszenie o 4,8%).



Rys. 8. Wyniki obliczeń wskaźnika stateczności metodą Janbu dla wariantu W3b bez materaca

Można więc stwierdzić, że zastosowanie materaca z geosiatek o niewielkiej wytrzymałości nie zmienia w istotny sposób warunków stateczności nasypu.



Rys. 9. Mapa przyrostów odkształceń postaciowych dla wariantu W3c (zbrojenie o długoterminowej wytrzymałości na rozciąganie 200 kN/m)

Wyniki obliczeń dla wariantu W3c ilustruje rysunek 9. Uzyskana z obliczeń MRS wartość wskaźnika stateczności wynosi 1,46 i jest o 4,3% większa od uzyskanej dla wariantu W3. Można więc stwierdzić, że nawet zastosowanie bardzo wytrzymałych geosiatek do zbrojenia materaca pod nasypem, nie powoduje znaczącego wzrostu wskaźnika stateczności. Odmienny jest natomiast przebieg powierzchni poślizgu. W przypadku zastosowania geosiatek o niewielkiej wytrzymałości powierzchnia ta przechodzi poniżej dolnej krawędzi skarpy, natomiast przy zastosowaniu mocnych geosiatek powierzchnia ta jest styczna do materaca. Na rysunku 9 przedstawiono również siły rozciągające w elementach modelujących zbrojenie. Maksymalne wartości tych sił dla górnego materaca wynoszą 109 kN/m. Jest to wartość ponad pięciokrotnie większa od doraźnej wytrzymałości geosiatek zastosowanych do zbrojenia nasypu uszkodzonego odcinka autostrady A-4, oraz ponad piętnastokrotnie większa od ich wytrzymałości długoterminowej.

Reasumując można więc stwierdzić, że nawet przy zastosowaniu bardzo wytrzymałych geosiatek nie jest możliwe osiągnięcie, w istniejących warunkach, wskaźnika stateczności 1,5. Zastosowanie mocnych geosiatek prowadzi bowiem do zmiany mechanizmu zniszczenia, a ewentualna utrata stateczności polega wówczas na poślizgu nasypu po powierzchni mocnego materaca. Z przeprowadzonych analiz wynika, że zapewnienie stateczności wymaga zmiany koncepcji stosowanych zabezpieczeń. Oprócz wzmocnienia podłoża konieczne jest również wzmocnienie korpusu i korony nasypu.

Wariant W4

W wariancie tym przyjęto wartości parametrów wytrzymałościowych gruntów nasypu i podłoża, jak w pracach [10, 11]. Uzyskane dla tego zestawu danych wartości wskaźników stateczności wynoszą od 2,13 z obliczeń MRS do 2,346 z obliczeń metodą Bishopa. Należy jednak podkreślić, że wyniki te uzyskano przy przyjęciu bardzo wysokich wartości parametrów wytrzymałościowych gruntów podłoża i nasypu. Zwłaszcza wartość kohezji nasypu (67 kPa) wydaje się znacznie zawyżona, biorąc pod uwagę fakt, że materiał z którego zbudowano nasyp składa się głównie z gruntów sypkich. Jak wspomniano we wstępie tak wysoka wartość spójności jest prawdopodobnie wynikiem zastosowanej metodyki określania parametrów wytrzymałościowych, a nie cechą materiału.

4. Wnioski

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki obliczeń wskaźników stateczności

Wariant obliczeń	MRS		Bishop	Janbu
	bez obciążenia	z obciążeniem 25 kPa	bez obciążenia	bez obciążenia
W1	1,13	1,06	1,165	1,062
W2	1,31	1,24	1,355	1,224
W3	1,40	1,33	1,455	1,303
W3a	1,37	–	1,418	1,271
W3b	1,36	–	1,384	1,241
W4	2,27	2,13	2,346	2,230

Analiza wyników zamieszczonych w tabeli 2 upoważnia do wyciągnięcia następujących wniosków:

1. Uzyskane z obliczeń wartości wskaźników stateczności dla wszystkich wariantów, z wyjątkiem wariantu W4, nie spełniają wymagań odnośnie nasypów drogowych i przyjmują wartości mniejsze bądź znacznie mniejsze od 1,5. Należy również podkreślić, że w przeprowadzonych analizach nie uwzględniano deformacji podłoża na skutek eksploatacji. Świadczy to o nieprawidłowym zaprojektowaniu nasypu w istniejących warunkach i możliwości utraty stateczności nawet bez wpływów działalności górniczej.
2. Analiza uzyskanych wyników wskazuje na niewielki wpływ zwiększenia nachylenia podłoża, wywołanego eksploatacją górniczą na warunki stateczności. Jak wykazały obliczenia MRS oraz metodami równowagi granicznej wzrost nachylenia o 1% w kierunku północnym powoduje zmniejszenie wskaźnika stateczności o zaledwie ok. 2,5%.
3. Wzmocnienie podłoża nasypu uszkodzonego odcinka autostrady A-4 polegające na zastosowaniu materaca z geosiatek i kruszywa, nie ma praktycznie wpływu na warunki stateczności. Niezależnie od rodzaju zastosowanych geosiatek uzyskane z obliczeń wartości wskaźników są zbliżone. Wytrzymałość zastosowanych geosiatek wpływa natomiast istotnie na charakter potencjalnej powierzchni poślizgu. Przy słabych geosiatkach powierzchnia ta przebiega poniżej dolnej krawędzi skarpy, natomiast przy mocnych możliwy jest poślizg nasypu po powierzchni materaca.

4. Z przeprowadzonych analiz wynika, że zapewnienie stateczności wymaga zmiany koncepcji stosowanych dotychczas zabezpieczeń nasypów poddanych wpływowi działalności górniczej. Wydaje się, że znaczną poprawę warunków stateczności można uzyskać poprzez wzmocnienie oprócz podłoża również korpusu i korony nasypu.

Literatura

- [1] BS 8006:1995: Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills
- [2] Cała M., Cieślak J., Flisiak J., Kowalski M.: Przyczyny awarii nasypu autostrady A4 pomiędzy węzłami „Wirek” i „Batorego” w świetle obliczeń numerycznych. Materiały XXIX Zimowej Szkoły Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii
- [3] Cała M., Flisiak J.: Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. XXIII ZSMG 2000, Wydawnictwo KGBiG Kraków, ss. 27-37
- [4] Cała M., Flisiak J.: Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics* (edited by Bilaux, Rachez, Detournay & Hart). A.A. Balkema Publishers 2000, pp. 111-114
- [5] Cała M., Flisiak J.: Slope stability analysis with numerical and limit equilibrium methods. [In:] Bureczynski, Fedelinski & Majchrzak (eds.): *Computer Methods in Mechanics 2003*
- [6] Dawson E.M., Roth W.H.: Slope stability analysis with FLAC. *FLAC and numerical modeling in geomechanics* (Detournay & Hart), A.A. Balkema 1999, Rotterdam, pp. 3-9
- [7] Ericson H., Drescher A.: The use of geosynthetics to reinforce low volume roads. Technical report no. MN/RC – 2001-15, 2001 (opracowanie niepublik.)
- [8] Glazer Z.: *Mechanika gruntów*. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1985
- [9] Gryczmański M.: Wpływ eksploatacji górniczej na nasypy i ich zabezpieczenie. Konferencja Naukowo-Techniczna: Autostrady na Terenach Górniczych, Katowice 1998
- [10] Gryczmański M., Sternik K.: Analiza przyczyn awarii nasypu autostrady A-4 na odcinku od 330+800 do 331+100 oraz uzasadnienie i koncepcja wzmocnienia budowli. Opracowanie wykonane przez DiPG „Geokonsulting” na zlecenie PRINŻ Holding S.A. w Katowicach. Gliwice październik-listopad 2004 r. (praca niepublik.)
- [11] Gryczmański M., Sternik K.: Awaria wysokiego nasypu autostrady A-4 między węzłami „Wirek” – „Batorego”. XXII Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane 2005, Szczecin–Międzyzdroje 2005
- [12] Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. GDDP, W-wa 1998
- [13] Kliszewicz B.: Analiza zagrożeń kanalizacji deszczowej na odcinku autostrady A-4 między węzłami „Wirek” – „Batorego”. XXII Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane 2005, Szczecin–Międzyzdroje 2005
- [14] Lane P.A., Griffiths D.V.: Finite element slope stability analysis – Why are engineers still drawing circles? *Numerical Models in Geomechanics* (Pietruszczak & Pande), A.A. Balkema 1997, Rotterdam, pp. 589-593
- [15] Określenie wytrzymałości na ścinanie przekruszonego materiału skalnego w aspekcie wykorzystania go do budowy nasypu autostradowego. Katedra Mechaniki gruntów i budownictwa ziemnego, Akademia Rolnicza w Krakowie, czerwiec–lipiec, 2003 (praca niepublik.)
- [16] Pisarczyk S.: *Grunty nasypowe*. OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004
- [17] Porozumienie GDDKiA Oddział Katowice oraz Kompanii Węglowej S.A. w Katowicach z dn. 10.12.2003 r.
- [18] Pullout Tests of Geogrids <http://www.tenaxus.com/roads/designinformation/GRID-te5.pdf>.
- [19] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. (Dz.U. Nr 43, poz. 430)

- [20] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie. (Dz.U. Nr 63, poz. 735)
- [21] Strycharz B., Chlipalski K., Grygierek M.: Obliczenie deformacji powierzchni w rejonie autostrady A-4 między węzłami „Wirek” – „Batorego”. XXII Konferencja Naukowo-Techniczna Awaryjne Budowlane 2005, Szczecin–Międzyzdroje 2005
- [22] Strycharz B.: Problemy projektowania i utrzymania autostrad na terenach górniczych. Konferencja Naukowo-Techniczna: Autostrady na Terenach Górniczych, Katowice 1998
- [23] Tenax Technical Papers, Reports and Design Manuals <http://www.tenaxus.com/roads/index.html>
- [24] Wytyczne wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. IBDiM, W-wa 2002
- [25] Zamierzenie budowlane: Budowa Autostrady A-4 Gliwice-Katowice. Odcinek Węzeł Wirek – Węzeł Batorego, km 325+232.80-332+470.00. Projekt budowlany. Transprojekt. Krakowskie Biuro Projektów Dróg i Mostów, Kraków 2000
- [26] Zych K.: Wstępna analiza wyników pomiarów geodezyjnych w rejonie odcinka autostrady A-4 w km 330.700–331.200. Materiały XXIX Zimowej Szkoły Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii

Stability analysis of A-4 highway embankment between hubs Wirek and Batory

This paper shows the results of numerical analysis of embankment stability. The A-4 highway embankment between hubs Wirek and Batory was considered. The stability analysis was performed for four different cases. Several mechanical properties of embankment soil and subsoil were considered. Change of reinforcement capacity was also taken into consideration. The calculation results allowed to estimate the reasons of embankment failure.

