

PRZYCZYNY AWARII NASYPU AUTOSTRADY A-4 POMIĘDZY WĘZŁAMI „WIREK” I „BATOREGO” W ŚWIETLE OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Marek Cala, Jerzy Cieślak*, Jerzy Flisiak*, Michał Kowalski**

1. Wstęp

Autostrada A-4, której odcinek pomiędzy Katowicami a Gliwicami oddano do eksploatacji w 1995 roku, na długości około 36 km przebiega ponad rejonami aktualnie prowadzonej oraz planowanej eksploatacji dziewięciu kopalń. W filarze autostrady znajduje się około 600 mln ton zasobów operatywnych, których wydobyć dla niektórych kopalń – przede wszystkim Halemba, Zabrze-Bielszowice, Makoszowy i Polska-Wirek – jest zagadnieniem niezmiernie istotnym. Również południowy odcinek projektowanej autostrady A-1 na długości około 60 km przebiegać będzie przez obszary górnicze 13 kopalń.

Zasady budowy autostrad na terenach górniczych reguluje Zarządzenie Prezesa Urzędu Mieszkalnictwa i Rozwoju Miast z dnia 30.06.1998, zgodnie z którym:

- obiekty autostradowe muszą być odpowiednio zaprojektowane, a teren w ich rejonie nie powinien przekroczyć II kategorii szkód górniczych,
- wybrane przez projektantów obiekty inżynierskie, projektować i zabezpieczyć należy na wpływy III kategorii terenu górniczego.

Zarządzenie to nakłada na kopalnie obowiązek prowadzenia eksploatacji w taki sposób, aby w rejonie pasa autostradowego wskaźniki deformacji były niższe od dopuszczalnych dla II kategorii terenów górniczych (odkształcenia poziome $\epsilon \leq 1,5$ mm/m, nachylenia $T \leq 5,0$ mm/m), a na projektantów i wykonawców konieczność zastosowania odpowiednich zabezpieczeń.

Odcinek autostrady A-4 między węzłami „Wirek” i Batorego, zlokalizowany w km 325+232.80 ÷ 332+470.00, zrealizowany został na podstawie porozumienia zawartego w dniu 10.12.2003 r pomiędzy Kompanią Węglową S.A., w skład której wchodzi kopalnie „Sośnica”, „Makoszowy”, „Bielszowice”, „Halemba” i „Polska-Wirek”, a Generalną Dyrekcją Dróg Krajowych i Autostrad Oddział w Katowicach [8].

Po zakończeniu budowy odcinek autostrady zlokalizowany na wysokim nasypie w km 330+700 ÷ 331+200 uległ uszkodzeniu a jego naprawa poprzez gwoździowanie kosztowała ponad 7 mln zł. Ponieważ w rejonie uszkodzeń prowadzona była eksploatacja ściany 4c przez kopalnię „Polska-Wirek” przyjęto [4, 5, 10], że jedyną przyczyną powstałej awarii były deformacje wywołane eksploatacją tej ściany. Ponieważ wyjaśnienie takie budzi szereg wątpliwo-

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki Budownictwa i Geotechniki

ści, przeprowadzono szczegółową analizę, której celem było sprawdzenie, czy inne, nie związane z górnictwem czynniki mogły przyczynić się do wystąpienia wspomnianej awarii. W tym celu przeprowadzono szczegółową analizę dostępnej dokumentacji i jej zgodności z obowiązującymi przepisami oraz przeprowadzono obliczenia numeryczne, dla sprawdzenia, czy zastosowane zabezpieczenia były wystarczające w istniejących warunkach.

Wyjaśnienie rzeczywistych przyczyn powstałej awarii ma doniosłe znaczenie zarówno dla budowniczych dróg na terenach objętych podziemną działalnością górniczą, jak i dla kopalń. Umożliwi ono bowiem udoskonalenie zasad eksploatacji jak i opracowanie doskonałych metod zabezpieczeń budowli drogowych.

W referacie przedstawiono wyniki obliczeń stanu naprężenia i odkształcenia nasypu w rejonie awarii, uzyskane z zastosowania programu metody elementów skończonych ABAQUS oraz programu różnic skończonych FLAC. Ocenie przyczyn powstałej awarii poświęcona jest również praca [1], w której omówiono wyniki analizy stateczności nasypu, przeprowadzonej metodami równowagi granicznej (program SLOPE/W) oraz metodą różnic skończonych.

2. Opis warunków w rejonie wystąpienia awarii oraz zastosowanych zabezpieczeń

W rejonie awarii autostrada zlokalizowana jest na wysokim nasypie, uformowanym na podłożu o nachyleniu około 10% w kierunku północno-wschodnim, zgodnym z normalną do osi autostrady. Maksymalna wysokość nasypu wynosiła 11,32 m (przy skarpie północnej), a nachylenie skarp, zarówno północnej jak i południowej, było zbliżone do 1:1,5 (ok. 34°). W podłożu nasypu stwierdzono [13] występowanie słabych gruntów wysadzinowych w stanie plastycznym i twardoplastycznym o parametrach:

- | | |
|---------------|---|
| warstwa VIII | – gliny i pyły piaszczyste:
$I_L = 0,36, \varphi = 12^\circ, c = 10,0 \text{ kPa},$ |
| warstwa IX, X | – gliny i pyły twardoplastyczne:
$I_L = 0,17 \div 0,25, \varphi = 14^\circ \div 15^\circ, c = 15,0 \text{ kPa}.$ |

Warunki gruntowe w rejonie awarii zakwalifikowano jako skomplikowane a budowla zaliczona została do III kategorii geotechnicznej.

Dla zabezpieczenia przed ujemnymi skutkami deformacji górniczych projekt [13] przewidywał, że nawierzchnia w wykopach wzmacniana będzie przy pomocy geosiatek o wytrzymałości na rozciąganie większej od 40 kN/m, natomiast dla nasypów wzmocnienia nawierzchni nie przewiduje się, stwierdzając, że: „*Odcinki trasy autostrady przebiegające na nasypach posiadają niezależnie obliczone i zaprojektowane zabezpieczenia przed wpływami eksploatacji górniczej polegające na zastosowaniu „materaca zbrojonego” układanego na istniejącym terenie*”. W projekcie przewidywano zastosowanie dwóch typów zbrojenia podłoża nasypów:

- Typ I: – geosiatka o wytrzymałości > 20 kN/m,
 – 35 cm warstwa z kruszywa łamanego,
 – geosiatka o wytrzymałości > 40 kN/m;
 Typ II: – geosiatka o wytrzymałości > 20 kN/m,
 – 35 cm warstwa z kruszywa łamanego,
 – geosiatka o wytrzymałości > 20 kN/m.

Zgodnie z projektem [13] typ II zbrojenia powinien być stosowany w przypadkach poziomych odkształceń górniczych nie przekraczających 2,5 mm/m a typ I zbrojenia należy stosować przy większych wartościach odkształceń oraz wówczas, gdy wysokość nasypu przekracza 10 m lub gdy w podłożu do głębokości 6 m występują grunty spójne o stopniu plastyczności $I_L > 0,25$.

Dla wzmocnienia słabego podłoża na odcinku w km 330+850 ÷ 331+170 projekt [13] przewidywał zastosowanie pali iniekcyjnych *jet grouting* o średnicy 80 cm w rozstawie 4,0×4,0 m i o długości uzależnionej od miąższości i głębokości występowania słabych warstw gruntu.

Nasyp wykonany był głównie z gruntów urobionych przy wykonywaniu wykopów z nim sąsiadujących. Dokładny skład granulometryczny gruntów wbudowanych w nasyp jest nieznan. Z badań przeprowadzonych przez AR [6] w Krakowie wynika, że są to głównie grunty niespoiste, w których zawartość frakcji pyłowej i ilowej wynosi:

- dla próby pobranej z nasypu – 11,83%,
- dla próby I pobranej z MOP Halemba – 31,57%,
- dla próby II pobranej z MOP Halemba – 13,89%.

Otwartą jest kwestia wartości parametrów wytrzymałościowych gruntów, z których zbudowany jest nasyp. W projekcie [13] przyjęto, że parametry te są następujące:

- ciężar objętościowy 20 kN/m³,
- kąt tarcia wewnętrznego 25°,
- kohezja 18 kPa.

Znacznie wyższe wartości parametrów wytrzymałościowych uzyskano z badań AR [6] w średniowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania (skrzynka 300 mm × 300 mm, przekładki o grubości 30 mm).

Dla gruntów pobranych z nasypu autostradowego uzyskano następujące wartości parametrów wytrzymałościowych:

- kąt tarcia wewnętrznego 40,2°,
- kohezja 75,8 kPa,

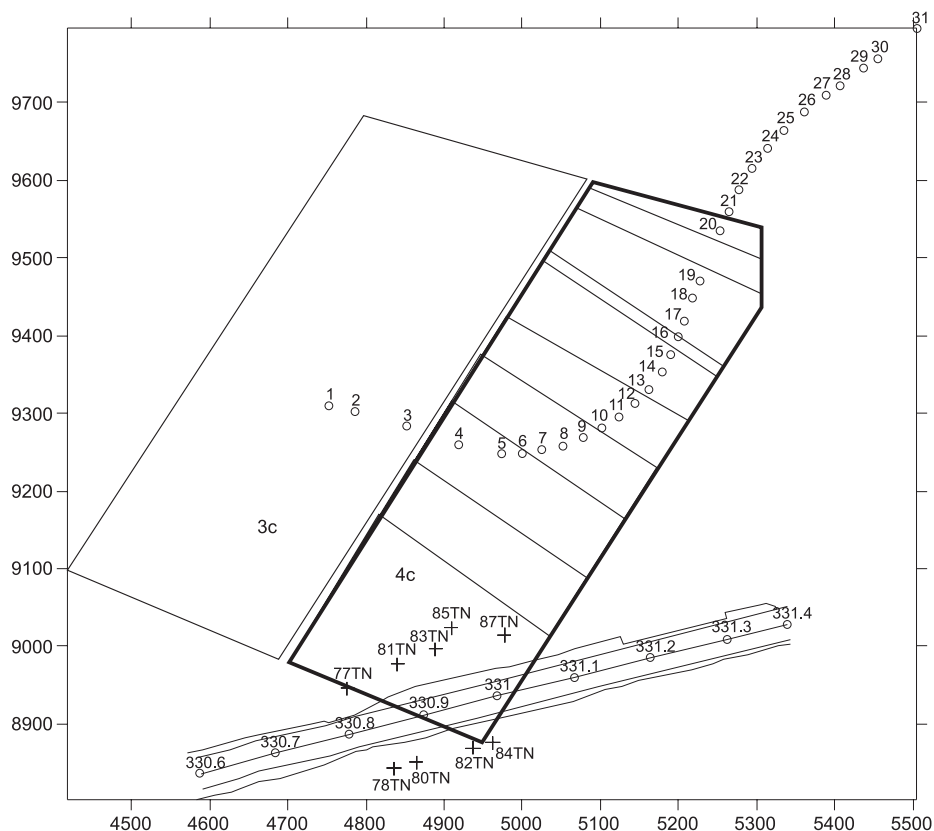
a dla gruntów pobranych w rejonie MOP Halemba:

- kąt tarcia wewnętrznego 26,1° (próba 1), 38,9° (próba 2),
- kohezja 67,3 kPa (próba 1), 83,3 kPa (próba 2).

Uzyskana z powyższych badań bardzo wysoka spójność budzi poważne wątpliwości. Jest ona prawdopodobnie spowodowana znanym zjawiskiem klinowania się grubych ziarn przy ściankach aparatu bezpośredniego ścinania. Uzyskiwana w badaniach bezpośredniego ścinania wysoka spójność gruntów z natury niespoistych nie jest więc cechą materiału, ale wynikiem błędów związanych ze stosowaną procedurą badawczą, której „...nie należy uwzględniać przy obliczaniu stateczności nasypów budowli...” [7].

W rejonie wystąpienia awarii w przeszłości eksploatowano 7 pokładów, w tym 5 poniżej pokładu 413/1 a 2 ponad nim. W okresie od maja 2003 roku do marca 2004, a więc w okresie budowy autostrady, w kopalni Polska-Wirek prowadzona była eksploatacja ściany 3c w pokładzie 413/1. Średnia głębokość tej ściany wynosiła 550 m, a grubość eksploatowanej warstwy ok. 1,6 m. Była to eksploatacja z zawałem stropu z równoczesnym doszczelnianiem zrobów zawałowych. Eksploatację ściany 4c, o grubości ok. 2,0 m na głębokości ok. 540 m, rozpoczęto na początku maja 2004 r. a zakończono w styczniu 2005 r.

Lokalizację wymienionych ścian przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Położenie krawędzi ścian 3C i 4C w stosunku do analizowanego odcinka autostrady A-4

Pierwsze przejawy awarii nasypu zaobserwowano 17.09.2004. Zaobserwowano wówczas [10], że „Deformacje nieciągłe powstały w gruncie i w nawierzchni. Mają one charakter pęknięć i szczelin, o rozwarości do kilku centymetrów. Lokalnie – tam gdzie to było możliwe – zmierzono głębokość szczeliny i stwierdzono, iż dochodzi ona do 2 m. Pęknięcia i szczeliny usytuowane są w większości równoległe do osi autostrady, lokalnie zaobserwowano też ich ukośne położenie względem osi. Nieciągłości równoległe do osi zaobserwowano w gruncie, przy krawędzi południowej jezdni autostrady w rejonie km 330+900 oraz w pasie rozdzielczym w km 330+900 ÷ 331+100. Natomiast deformacje nieciągłe ukośne do osi autostrady zinventaryzowane zostały na nawierzchni jezdni północnej w rejonie km 330+750.”

3. Koncepcja i cel obliczeń numerycznych

Prezentowane w tym referacie obliczenia miały dać odpowiedź na dwa pytania:

1. Co było przyczyną uszkodzenia nasypu autostrady (korony nasypu w pasie rozdzielczym i jezdni) i jakie czynniki miały wpływ na te uszkodzenia,

2. Czy zabezpieczenie nasypu autostrady w trudnych warunkach (skomplikowane warunki gruntowe, nachylone konsekwentnie podłoże, III kategoria geotechniczna) było prawidłowe i wystarczające, aby deformacje górnicze odpowiadające II kategorii terenu nie spowodowały jego uszkodzenia.

W kontekście tak postawionych pytań zakres przeprowadzonych obliczeń obejmował:

- Sprawdzenie możliwości uszkodzenia nasypu i podłoża autostrady pod własnym ciężarem w trakcie wznoszenia obiektu,
- Sprawdzenie możliwości uszkodzenia nasypu, pod działaniem ciężaru własnego oraz poddanego wpływom deformacji górniczych.

Obliczenia wykonano wykorzystując dwie różne techniki numeryczne – metodę elementów skończonych i metodę różnic skończonych. Aby umożliwić porównanie uzyskanych wyników we wszystkich prezentowanych obliczeniach przyjęto takie same założenia dotyczące geometrii obiektu, modeli fizycznych i ich parametrów oraz poszczególnych etapów obliczeń. Należy zaznaczyć, że założenia te odpowiadały danym projektowym.

4. Założenia modeli numerycznych

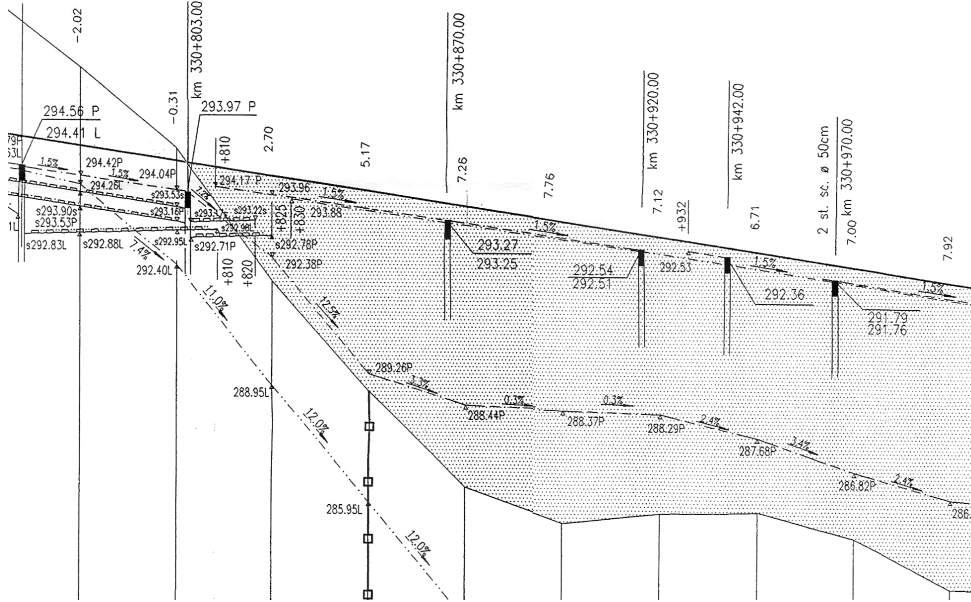
W rejonie rozpatrywanego odcinka autostrady topografia terenu ma złożony charakter. Trasa autostrady w analizowanym rejonie biegnie początkowo w wykopie, następnie przechodzi w nasyp o wysokości od strony północnej ok. 11 m, od południowej ok. 6 m. W analizowanym przekroju szerokość korony nasypu wynosi 35,83 m, zaś jego podstawy 60,24 m. Nachylenie podłoża nasypu w kierunku zgodnym z osią autostrady, na początkowym odcinku o długości 67 m, licząc od miejsca przejścia z wykopu w nasyp, dochodzi do 12%, a następnie stopniowo spada do 5,9% i ostatecznie do 0,3%. Poza tym podłoże nasypu nachylone jest w kierunku prostopadłym do osi. Nachylenie to wynosi od 9,4 do 10%, a w rejonie lokalnych skarp jest znacznie większe. Topografię terenu oraz budowę geologiczną nasypu i podłoża analizowanego odcinka autostrady pokazano na rysunkach 2 i 3 w dwóch przekrojach [13]. Wymienione wyżej elementy przestrzennej geometrii obiektu, niewątpliwie mają istotne znaczenie na jego zachowanie i powinny znaleźć swoje odbicie w modelu numerycznym. Ze względu jednak na złożoność całego problemu, zarówno od strony fizycznej, jak i technologicznej, zdecydowano się uprościć geometrię zadania z trójwymiarowego do dwuwymiarowego, w płaskim stanie odkształcenia.

W związku z tym założeniem model uwzględniał jedynie poprzeczne do osi autostrady nachylenie równe 10%. Przekrój autostrady przyjęty do obliczeń obejmował nasyp, podłoże gruntowe (w rozpatrywanym rejonie autostrady o grubości 6 m), podłoże karbonu oraz elementy strukturalnego wzmocnienia w postaci zamkniętego materaca wykonanego z żużla oraz geosiatki typu 220 i 440 LBO SAMP firmy Tenax.

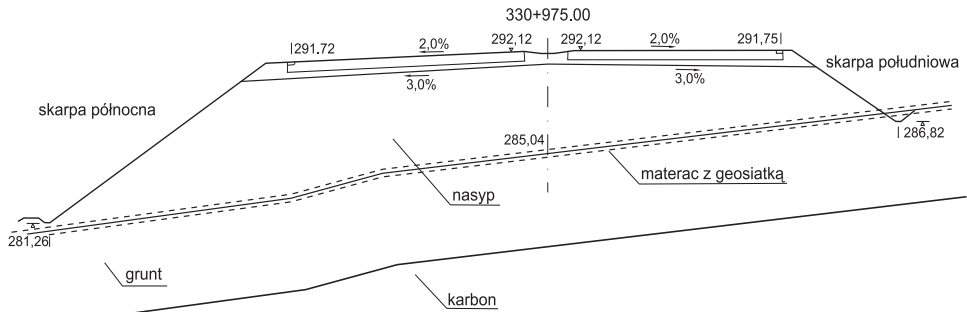
Od strony fizycznej analiza zachowania nasypu zbrojonego geosiatką z materacem, poddanego wpływom deformacji górniczych jest zagadnieniem skomplikowanym. Kluczowe znaczenie, ze względu na jakość rozwiązania, ma zarówno sposób modelowania materaca oplecionego geosiatką, stanowiącego podstawowe w tym przypadku wzmocnienie i zabezpieczenie nasypu, jak również dobór modeli fizycznych i parametrów tych modeli dla poszczególnych rodzajów gruntu. Przyjęto, że materac zbudowany jest z żużla wielkopieczowego,

nasyp z mieszanki okruszków piaskowca, piasku oraz gliny (zgodnie z dokumentacją projektową), a w podłożu zalegają utwory wariantowo:

- gliny pylastej plastycznej (jak wynika z rozpoznania geotechnicznego),
- gliny pylastej twardoplastycznej wzmocnionej poprzez *jet grouting* (zgodnie z zaleceniami projektowymi).



Rys. 2. Projektowany przekrój podłużny (wzdłuż osi) Autostrady A4 w rejonie uszkodzenia nasypu [10]



Rys. 3. Projektowany przekrój poprzeczny autostrady w rejonie uszkodzenia nasypu

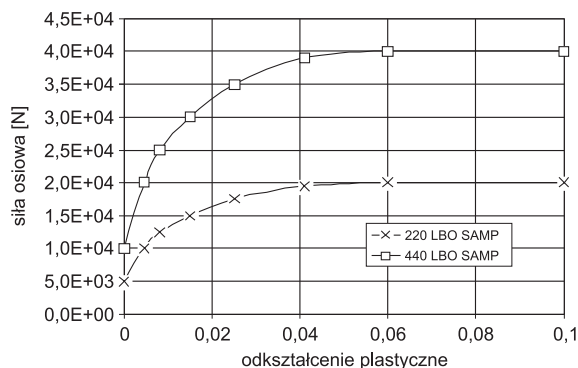
Dla wymienionych warstw geologicznych obiektu przyjęto taki sam idealnie sprężysto-plastyczny model fizyczny, z liniowym warunkiem plastyczności (Coulomba–Mohra) i stowarzyszonym z nim prawem plastycznego płynięcia. Poszczególne warianty podłoża oraz odpowiadające im parametry fizyko-mechaniczne przyjęte do obliczeń, w oparciu o dokumentację projektową, zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości parametrów fizycznych przyjęte w obliczeniach

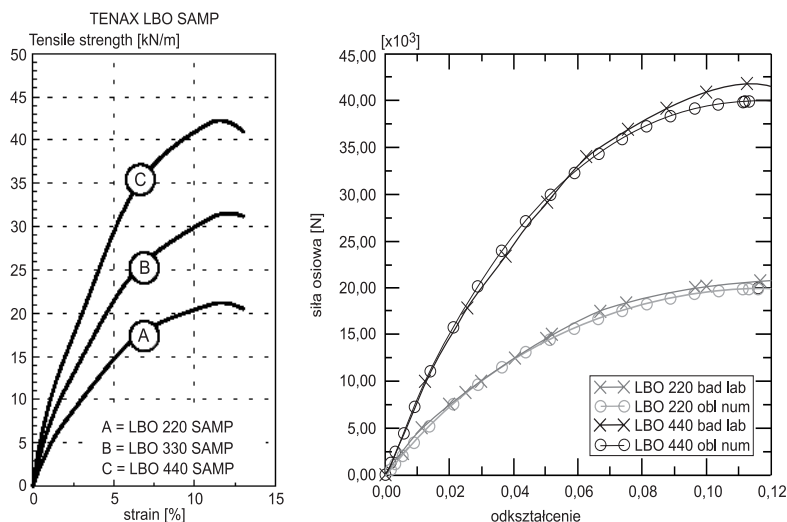
Wariant obliczeń	Warstwa	γ [kN/m ³]	E [MPa]	ν [-]	c [kPa]	Φ [°]
W1	Nasyp	20,000	60	0,25	18,000	25,00
	Materac	16,000	60	0,25	60,790	45,80
	Podłoże	20,500	25	0,30	11,000	12,00
W3 <i>jet grouting</i>	Nasyp	20,000	60	0,25	18,000	25,00
	Materac	16,000	60	0,25	60,790	45,80
	Podłoże	20,775	30	0,25	22,707	15,73

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.

Geosiatkę modelowano elementami prętowymi nie przenoszącymi ściskania (przy obciążeniu ściskającym sztywność elementu była automatycznie redukowana do zera). Przyjęto sprężysto-plastyczny z wzmocnieniem model fizyczny geosiatki, z warunkiem plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego i stowarzyszonym prawem płynięcia. Parametry modelu wyznaczono na podstawie danych technicznych geosiatek typu 220 i 440 LBO SAMP firmy Tenax. Parametry sprężyste określono dla 2% wartości odkształcenia z próby jednoosiowego rozciągania. Izotropowe wzmocnienie przyjęto jako zależność pomiędzy granicą plastyczności, a odkształceniem plastycznym, wyznaczonej z testu jednoosiowego rozciągania siatek. Wartość odkształceń plastycznych wyliczono jako różnicę pomiędzy całkowitym a sprężystym odkształceniem przy danym obciążeniu. Wykresy zależności pomiędzy siłą odpowiadającą granicy plastyczności, a plastycznym odkształceniem, przyjęte do obliczeń dla poszczególnych typów siatek przedstawia rysunek 4.

**Rys. 4.** Graficzna interpretacja funkcji wzmocnienia izotropowego dla siatek LBO 220 i LBO 440

W celu zweryfikowania przyjętego modelu fizycznego przeprowadzono wstępne obliczenia numeryczne, symulujące próbę rozciągania siatki. Wyniki tych obliczeń dla geosiatek typu LBO 220 i LBO 440 SAMP, w porównaniu z wynikami doświadczeń laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Zestawienie wyników badań laboratoryjnych i obliczeń numerycznych dla siatek LBO 220 i LBO 440 SAMP (po lewej dane firmy Tenax [9], po prawej zestawienie wyników badań laboratoryjnych i obliczeń)

Kółkami oznaczono wyniki obliczeń numerycznych, krzyżykami wyniki badań laboratoryjnych. Jak można zauważyć zgodność uzyskanych wyników obliczeń z wynikami uzyskanymi w doświadczeniu, do momentu zerwania siatki jest zadawalająca.

Przyjęto, że kontakt pomiędzy geosiatką, podłożem, materacem, oraz nasypem zachodzi zgodnie z prawem tarcia Coulomba. Wartość kąta tarcia (bądź współczynnika tarcia) przyjmowana w tego typu obliczeniach zawsze jest dyskusyjna i przyjmowana różnie przez różnych autorów. Najczęściej zakłada się, że wartość kąta tarcia pomiędzy geosiatką a gruntem jest funkcją kąta tarcia wewnętrznego gruntu:

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

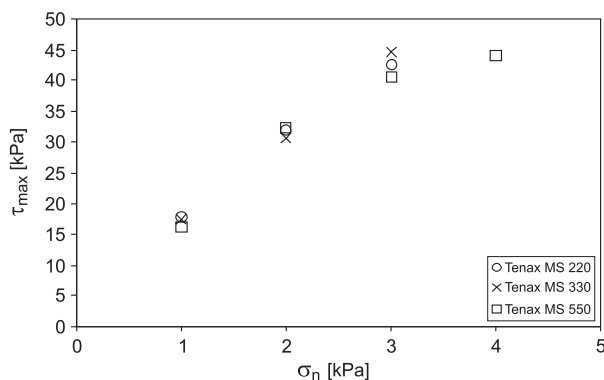
gdzie: φ_i – kąt tarcia na kontakcie,
 φ_s – kąt tarcia wewnętrznego gruntu,
 F – współczynnik redukcyjny.

Wartość współczynnika redukcyjnego przyjmowana jest różnie przez różnych autorów, przykładowo Ericson i Drescher [2] przyjmują $F = 1,0$, Gryczmański i Sternik [5] $F = 0,33$.

Podstawą do wyznaczenia współczynnika tarcia mogą również być wyniki badań laboratoryjnych lub polowych tzw. testu *pull-out*, czyli wrywania geosiatki z gruntu poddane go różnego rodzaju obciążeniom. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki takich doświadczeń wykonanych dla piasku, z wykorzystaniem geosiatek MS 220, MS 330, MS 440 firmy Tenax.

Charakter zależności $\tau_{\max} - \sigma_n$ uzyskany dla wszystkich typów siatek jest podobny i nieliniowy, a współczynnik tarcia można wyliczyć jedynie jako wartość lokalną, wynikającą z nachylenia wykresu w wybranym przedziale stosowanych w teście naprężeń normalnych. Dla prezentowanych wyników wartość współczynnika tarcia μ jest zmienna i waha się od $\mu = 1,59$ dla małych wartości naprężenia normalnego (siatka typu MS 220), do $\mu = 0,34$ dla

naprężeń normalnych w przedziale $30 < \sigma_n < 40$ kPa (również dla siatki typu MS 220). Należy jednak zaznaczyć, że w przypadku obiektów takich jak nasyp o znacznej wysokości, naprężenia normalne na kontakcie poszczególnych warstw z geosiatką będą przybierały dużo wyższe wartości niż w prezentowanym teście. Wynika stąd wniosek, że jeżeli przy wyznaczaniu współczynnika korzystać z wyników testu *pull-out*, to w takim przypadku, do obliczeń przyjąć należy wartości współczynnika uzyskane dla największych naprężeń normalnych kontaktu stosowanych w teście.



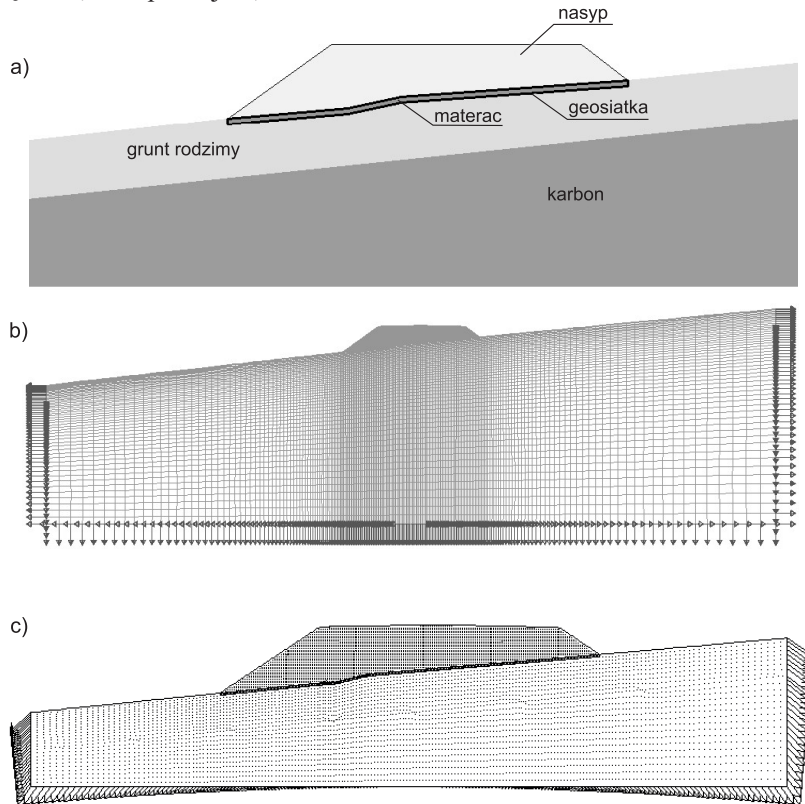
Rys. 6. Zależności $\tau_{max} - \sigma_n$ testu *pull-out* siatek MS 220, MS 330, MS 440 firmy Tenax (τ_{max} – maksymalne naprężenie styczne odpowiadające maksymalnej sile przyłożonej do geosiatki, σ_n – naprężenie normalne w płaszczyźnie kontaktowej)

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenia, współczynnik tarcia zdecydowano się wyznaczać dwuetapowo. Na wstępie, dla wybranego kontaktu, wyliczono wartość współczynnika wynikająca 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 tarcia dla odpowiednich par kontaktowych modelu obliczeniowego zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości współczynników tarcia pomiędzy geosiatką a poszczególnymi warstwami przyjęte w obliczeniach numerycznych

Wariant obliczeń	Warstwa	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ [°]	Współczynnik tarcia kontaktu μ
W1	Nasyp – Geosiatka	25,00	0,37
	Materac – Geosiatka	45,80	0,82
	Podłoże – Geosiatka	12,00	0,35
W3 <i>jet grouting</i>	Nasyp – Geosiatka	25,00	0,37
	Materac – Geosiatka	45,80	0,82
	Podłoże – Geosiatka	15,73	0,35

Geometrię modeli obliczeniowych MES i MRS wraz z zaznaczonymi wszystkimi strefami materiałowymi, ich dyskretyzację oraz warunki brzegowe przedstawiono na rysunku 7a, b i c. Wymiary modelu wynosiły odpowiednio: szerokość 320 m, wysokość odpowiednio lewej części 56,7 m i prawej 87,8 m.



Rys. 7. Geometria, dyskretyzacja oraz warunki brzegowe numerycznych modeli obliczeniowych: a) geometria modelu wraz z układem stref materiałowych, b) dyskretyzacja i warunki brzegowe odpowiadające modelom MES, c) dyskretyzacja i warunki brzegowe odpowiadające modelom MRS (w obu przypadkach wektory przemieszczeń nie są pokazane w odpowiedniej skali)

W model MES wygenerowano 28877 elementów zagęszczonych w rejonie nasypu, przy czym w podłożu oraz w materacu zastosowano czworokątne elementy czterowęzłowe, a w nasypie, ze względu na złożony kształt elementy trójkątne. Geosiatkę modelowano dwuwęzłowymi elementami prętowymi. Zadanie rozwiązano wykorzystując przyrostową metodę rozwiązywania równań algebraicznych MES, połączoną z algorytmem iteracyjnym Newtona.

Model MRS podzielono na 9198 stref zagęszczonych w rejonie materaca i nasypu, przy czym grunty dyskretyzowano przy użyciu siatek nieregularnych.

W obu modelach numerycznych poszczególne etapy obliczeń umożliwiały uzyskanie, w pierwszym kroku obliczeniowym, pierwotnego stanu naprężenia, wynikającego z ciężaru własnego ośrodka, a następnie analizę wznoszenia nasypu w kilku krokach obliczeniowych.

W końcowym etapie obliczeń modele poddane zostały wymuszeniom odpowiadającym górnym deformacjom powierzchni terenu II kategorii. Zadano je na brzegach modeli w postaci odpowiednich przemieszczeń węzłów elementów skończonych w modelu MES, oraz węzłów siatki stref w przypadku MRS. Ze względu na orientację eksploatacji względem osi autostrady (rys. 1) założono, że nasyp autostrady znajduje się na wypukłej części niecki, czyli w położeniu najbardziej niekorzystnym z punktu widzenia obciążenia podłoża (rozluźnienie i rozpyływanie gruntu). W przypadku deformacji II kategorii terenu, zadane wymuszenia na brzegach modelu odpowiadały odkształceniom poziomym podłoża nasypu, $\varepsilon = 3,0$ mm/m i promieniowi krzywizny 12 km.

Obliczenia w obu metodach przeprowadzono według tego samego, powtarzającego się schematu:

- zadanie pierwotnego stanu naprężenia,
- etapy wykonania materaca i nasypu (cztery kroki obliczeniowe),
- wymuszenie kinematyczne odpowiadające deformacjom powierzchni terenu.

5. Wyniki obliczeń numerycznych w poszczególnych wariantach

W referacie zaprezentowano wyniki obliczeń dla dwóch wariantów podłoża (w rzeczywistości obliczenia prowadzono dla czterech odmiennych wariantów, różniących się od siebie wartościami parametrów wytrzymałościowych podłoża i nasypu [1]), w których przyjęto, że podłoże gruntowe stanowią:

- plastyczne gliny pylaste – wariant W1,
- twaroplastyczne gliny pylaste, wzmocnionej poprzez *jet grouting* – wariant W3.

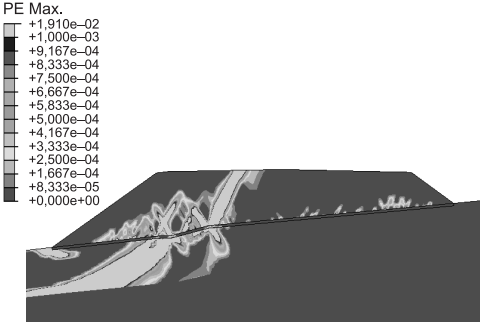
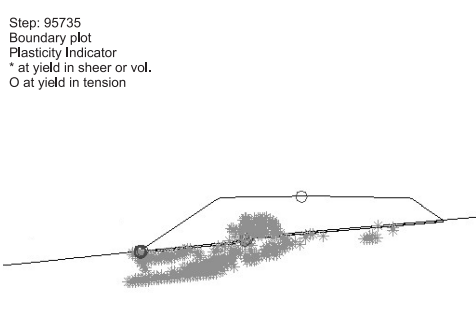
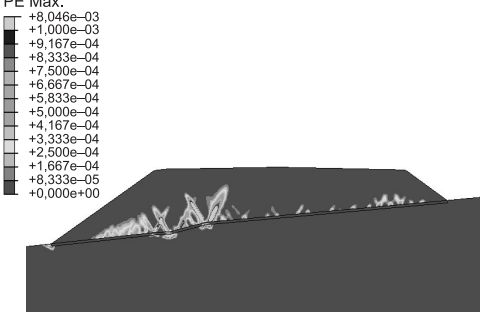
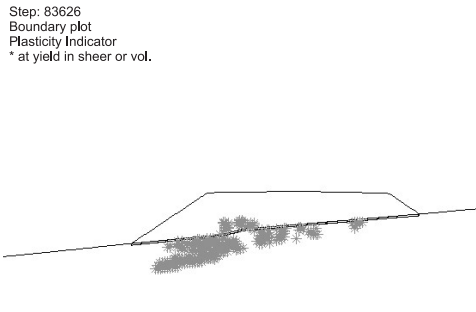
Analizie poddano dwa okresy funkcjonowania budowli ziemnej – etap wznoszenia nasypu autostrady i etap oddziaływania deformacji podłoża na skutek eksploatacji.

W tabeli 3 zestawiono wyniki obliczeń MES i MRS w postaci map największych głównych odkształceń plastycznych, odpowiadające etapowi ostatecznego wykonania nasypu.

Analizując wyniki obliczeń wszystkich wariantów, odpowiadających etapowi ukończenia budowy nasypu można stwierdzić, iż w przypadku obu wariantów W1 i W3, uszkodzenia podstawy nasypu oraz jego korony występują jeszcze w trakcie budowy nasypu, pod wpływem obciążenia własnym ciężarem. W przypadku podłoża wzmocnionego poprzez *jet grouting* uszkodzeniu ulega sama podstawa nasypu, a deformacje plastyczne nie osiagają korony. W takich warunkach nasyp ulega rozplynięciu, co jest wynikiem jego poślizgu w powierzchni kontaktu z materacem w kierunku północnym oraz znacznych odkształceń plastycznych podłoża. Słabe parametry warstwy gruntu w podłożu nasypu powodują jego niesymetryczne osiadanie, większe po stronie skarpy północnej, czego efektem są rozciągania w rdzeniu i koronie nasypu. Stąd też w przypadku wariantów obliczeń, w których przyjęto wzmocnienie parametrów podłoża poprzez *jet grouting* deformacje plastyczne w rdzeniu nasypu są mniejsze a w koronie nasypu nie występują.

W tabeli 4 zestawiono wyniki obliczeń dla etapu dodatkowego wymuszenia odpowiadającego górnym deformacjom II kategorii terenu. W tabeli tej zaprezentowano mapy największych głównych odkształceń plastycznych, a w tabeli 5 zestawiono wykresy największych głównych odkształceń plastycznych występujących w koronie nasypu w tym samym etapie obliczeń.

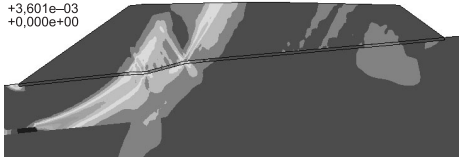
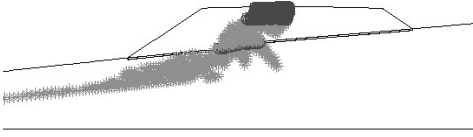
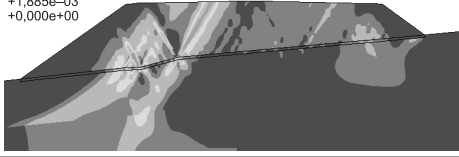
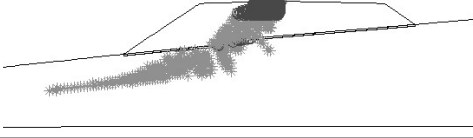
Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń

Wyniki MES	Wyniki MRS
Mapy $P_{e,max}$ — największych głównych odkształceń plastycznych. Warianty W1 i W2 odpowiadające etapowi zadanych deformacji górniczych	Mapy stref uplastycznienia. Warianty W1 i W2 odpowiadające etapowi zadanych deformacji górniczych
	
Wariant W1 podłoże – glina pylasta plastyczna	
	
Wariant W2 podłoże – glina pylasta twardoplastyczna + jet grouting	

Analizując wyniki obliczeń uzyskane dla modeli, w których uwzględniono deformacje powierzchni wynikających z II kategorii terenów górniczych można stwierdzić, że praktycznie w każdym wariancie obliczeń, wystąpić mogą poważne uszkodzenia rdzenia nasypu oraz duże wartości deformacji plastycznych w jego koronie. Deformacje te, zlokalizowane w środkowej części korony, mają charakter rozciągania.

W rzeczywistych warunkach deformacje takie mogą prowadzić do pojawienia się szczelin i pęknięć. Deformacje górnicze potęgują więc wykazane wyżej zjawisko rozpyływania się nasypu po materacu, zapoczątkowane jeszcze w fazie tworzenia nasypu. Należy zaznaczyć, że w żadnym z analizowanych modeli i żadnym etapie obliczeń, nie doszło do zerwania siatki i materaca.

Tabela 4. Zestawienie wyników obliczeń. Mapy $P_{e\max}$ dla etapu deformacji górniczych.

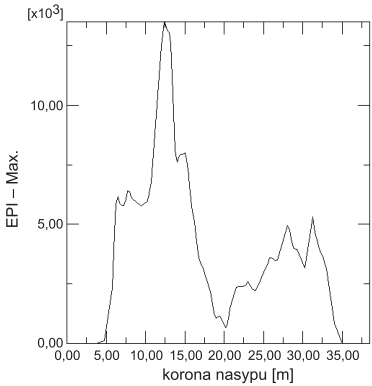
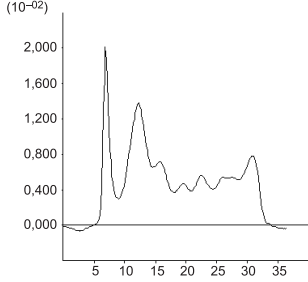
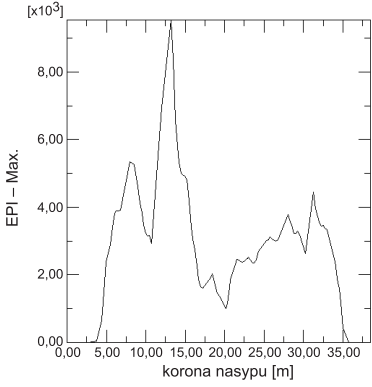
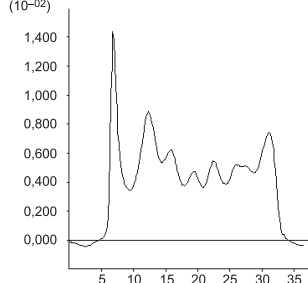
Wyniki MES	Wyniki MRS
<p>Mapy $P_{e\max}$ — największych głównych odkształceń plastycznych. Warianty W1 i W2 odpowiadające etapowi zadanych deformacji górniczych</p>	<p>Mapy stref uplastycznienia. Warianty W1 i W2 odpowiadające etapowi zadanych deformacji górniczych</p>
<p>PE Max.</p> <ul style="list-style-type: none"> +4.321e-02 +3.961e-02 +3.601e-02 +3.241e-02 +2.881e-02 +2.521e-02 +2.161e-02 +1.801e-02 +1.440e-02 +1.080e-02 +7.202e-03 +3.601e-03 +0,000e+00 	<p>Step: 165735 Boundary plot Plasticity Indicator * at yield in shear or vol. O at yield in tension</p> 
<p>Wariant W1 podłoże – glina pylasta plastyczna</p>	
<p>PE Max.</p> <ul style="list-style-type: none"> +2.263e-02 +2.074e-02 +1.005e-02 +1.697e-02 +1.506e-02 +1.320e-02 +1.131e-02 +9.427e-03 +7.542e-03 +5.656e-03 +3.771e-03 +1.885e-03 +0,000e+00 	<p>Step: 153626 Boundary plot Plasticity Indicator * at yield in shear or vol. O at yield in tension</p> 
<p>Wariant W2 podłoże – glina pylasta twaroplastyczna + jet grouting</p>	

6. Podsumowanie i wnioski

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że dla podłoża zbudowanego z plastycznej gliny pylastej oraz dla podłoża zbudowanego z twaroplastycznej gliny pylastej wzmocnionej poprzez *jet grouting*, uszkodzenia podstawy nasypu oraz jego korony mogą wystąpić jeszcze przed wystąpieniem odkształceń związanych z eksploatacją. W przypadku podłoża wzmocnionego poprzez *jet grouting* uszkodzeniu ulec może podstawa nasypu, a deformacje plastyczne nie dochodzą do samej korony. W takich warunkach nasyp ulega rozplynięciu, co jest wynikiem jego poślizgu w płaszczyźnie kontaktu z materacem, w kierunku północnego zbocza oraz znacznych odkształceń plastycznych podłoża. Niskie wartości parametrów warstwy gruntu podłoża nasypu powodują niesymetryczne jego osiadanie, większe po stronie skarpy północ-

nej, czego efektem są rozciągania w rdzeniu i koronie nasypu. Stąd też w przypadku wariantu obliczeń, w których przyjęto wzmocnienie parametrów podłoża poprzez *jet grouting* (wariant W3) deformacje plastyczne w rdzeniu nasypu są mniejsze.

Tabela 5. Zestawienie wykresów odkształceń plastycznych (MES) i poziomych (MRS) w koronie nasypu dla etapu uwzględniającego wpływ deformacji górniczych

Wyniki MES	Wyniki MRS
	<p>FLAC (Version 5.00)</p> <p>LEGEND</p> <p>6-Jul-05 15:24 step 165735 -6,852E+00 <x< 1,269E+02 -5,397E+01 <y< 7,980E+01</p> <p>Linear Profile Y - axis: EX_5 X - axis: Distance From(4,700E+01, 2,54E+01) To (8,35E+01, 2,54E+01)</p> 
<p>Wariant W1 — największe główne odkształcenia plastyczne w koronie nasypu odpowiadające etapowi zadanych deformacji górniczych II kategorii</p>	<p>Wariant W1 — odkształcenia poziome ϵ_x w koronie nasypu odpowiadające etapowi zadanych deformacji górniczych II kategorii</p>
	<p>FLAC (Version 5.00)</p> <p>LEGEND</p> <p>6-Jul-05 16:35 step 154002 -6,852E+00 <x< 1,269E+02 -5,397E+01 <y< 7,980E+01</p> <p>Linear Profile Y - axis: EX_5 X - axis: Distance From(4,700E+01, 2,54E+01) To (8,35E+01, 2,54E+01)</p> 
<p>Wariant W2 — największe główne odkształcenia plastyczne w koronie nasypu odpowiadające etapowi zadanych deformacji górniczych II kategorii</p>	<p>Wariant W2 — odkształcenia poziome ϵ_x w koronie nasypu odpowiadające etapowi zadanych deformacji górniczych II kategorii</p>

Wyniki obliczeń uzyskane dla warunków uwzględniających wpływy deformacji II kategorii wskazują, że w każdym analizowanym przypadku wystąpić mogą poważne uszkodzenia rdzenia nasypu na skutek pojawienia się dużych, rozciągających deformacji plastycznych, zlokalizowanych w środkowej części korpusu oraz w rejonie jego korony. Wartości tych odkształceń dochodzić mogą nawet 20 mm/m, czego konsekwencją mogą być spękania nasypu i nawierzchni.

W świetle przeprowadzonych obliczeń zauważalny jest niewielki wpływ zastosowanego materaca zbrojonego na odkształcenia powstałe w nasypie. Ze względu na duży współczynnik tarcia pomiędzy geosiatką, a gruntem (minimum 0,35), oraz dużą odkształcalność zastosowanych geosiatek, materac będzie odkształcał się dokładnie tak, jak podłoże na którym jest posadowiony. Pozwala to zrozumieć nieznaczny wpływ takiego zabezpieczenia na odkształcenia powstające w podstawie nasypu oraz w jego koronie.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zaprojektowane i zastosowane zabezpieczenie nasypu autostrady, poddanego wpływom deformacji odpowiadających II kategorii terenów górniczych, było niewystarczające w analizowanych warunkach geotechnicznych.

Należy zaznaczyć, że uproszczenie geometrii modelu z 3D do 2D było działaniem, które uniemożliwiło uwzględnienie znacznego nachylenia powierzchni gruntu rodzimego w kierunku osi autostrady. Należy przypuszczać, iż uwzględnienie również i tego nachylenia spowoduje, że wyniki otrzymane z takich analiz wykazywać będą znaczne pogorszenie kondycji obiektu.

Literatura

- [1] Cała M., Cieślik J., Flisiak J., Kowalski M.: Analiza warunków stateczności nasypu autostrady A-4 między węzłami „Wirek” – „Batorego”. Materiały XXIX Zimowej Szkoły Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii
- [2] Ericson H., Drescher A.: The use of geosynthetics to reinforce low volume roads. Technical report no. MN/RC – 2001-15, 2001 (opracowanie niepublik.)
- [3] Gryczmański M.: Wpływ eksploatacji górniczej na nasypy i ich zabezpieczenie. Konferencja Naukowo-Techniczna Autostrady na Terenach Górniczych, Katowice 1998
- [4] Gryczmański M., Sternik K.: Awaria wysokiego nasypu autostrady A-4 między węzłami „Wirek” – „Batorego”. XXII Konferencja Naukowo-Techniczna Awary Budowlane 2005, Szczecin–Międzyzdroje 2005
- [5] 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
- [6] 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.)
- [7] Pisarczyk S.: Grunty nasypowe. OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004
- [8] Porozumienie GDDKiA Oddział Katowice oraz Kompanii Węglowej S.A. w Katowicach z dn. 10.12.2003 r.
- [9] Pullout Tests of Geogrids <http://www.tenaxus.com/roads/designinformation/GRID-te5.pdf>.
- [10] Strycharz B., Chlipalski K., Grygierek M.: Obliczenie deformacji powierzchni w rejonie autostrady A-4 między węzłami „Wirek” – „Batorego”. XXII Konferencja Naukowo-Techniczna: Awary Budowlane 2005, Szczecin–Międzyzdroje 2005

- [11] Strycharz B.: Problemy projektowania i utrzymania autostrad na terenach górniczych. Konferencja Naukowo Techniczna Autostrady na Terenach Górniczych, Katowice 1998
- [12] Tenax Technical Papers, Reports and Design Manuals <http://www.tenaxus.com/roads/index.html>
- [13] 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

The causes of A-4 highway embankment failure between hubs Wirek and Batory in the light of numerical calculations

This paper presents the results of numerical calculations of embankment conditions utilising Finite Element Method and Finite Difference Method. The A-4 highway embankment between hubs Wirek and Batory was analysed. Not long after completing considered embankment several vertical cracks and joints in roadway and separating lane occurred. The damages took place in the vicinity of underground excavation of 4C longwall (seam 413/1) from Polska-Wirek coal mine. Analysis considered two different stages: first - embankment construction and second - mining deformations influence. The calculations results allowed to estimate the reasons of embankment failure.