



Prof. dr hab. inż. Maciej GRYZMAŃSKI, Maciej.Gryczmański@polsl.pl
Politechnika Śląska

JESZCZE O PRZYCZYNACH AWARII WYSOKIEGO NASYPU W KM 330+970 AUTOSTRADY A4

BACK TO THE SUBJECT OF CAUSES UNDERLYING THE STRUCTURAL FAILURE OF THE HIGH EMBANKMENT AT 330+970 KM STRETCH OF A4 MOTORWAY

Streszczenie. Referat jest repliką na opublikowane ostatnio opinie na temat przyczyn awarii nasypu na autostradzie A4, które podważają stanowisko wyrażone w prezentacjach problemu, w ramach poprzedniej konferencji „Awarie budowlane”.

W referacie zidentyfikowane są główne rozbieżności. Jak wykazano, obserwacje i pomiary nie potwierdzają tezy o utracie stateczności pod samym ciężarem nasypu. Nie jest również uzasadnione użycie w obliczeniach spójności tak zdecydowanie niższej od spójności wynikającej z badań w aparacie skrzynkowym, ani też przekonanie o nieprzydatności stosowanych geomateraców do ochrony nasypu przed szkodami górnictwami.

Abstract The paper is a response to ideas published recently, concerning the disputed causes of the structural failure of the A4 motorway's high embankment which appear to completely contradict the standpoint expressed when the problem was presented at the previous *Structural Failures* conference.

The paper identifies main controversies. It shows that observation and measurements do not support the claim that stability of the embankment was lost solely due to its own weight. It demonstrates that employing, for the purposes of the analysis, the values of cohesion so considerably lower than the cohesion obtained in shear box tests is utterly unjustified, as is the view that geomatresses are of no use as a method of protection of the embankment against mining deformations.

1. Kontrowersje w sprawie przyczyn awarii

Przypadek awarii wysokiego nasypu autostrady A-4 między węzłami „Wirek” i „Batorego”, a dokładniej w km 330+970, znalazł się centrum uwagi uczestników sesji „Geotechnika” poprzedniej XXII edycji Konferencji „Awarie Budowlane”. Został szczegółowo opisany i przeanalizowany w trzech komplementarnych referatach [7], [11], [19]. Wydawałoby się, że temat został wyczerpany. Nic bardziej błędnego. W kolejnych miesiącach rozgorzał ostry spór o przyczyny awarii, a w podtekście o winnego. Przeciwnie do prezentowanego na „Awariach Budowlanych” stanowisko zajęli autorzy konferencyjnych wystąpień [1], [2], [18] i artykułu [3]. W opinii adwersarzy współdecydującą z oddziaływaniami górnictwami przyczynę deformacji i uszkodzeń jezdni i poboczy autostrady stanowiły (cytuję za [1]): „*błędy popełnione w całym procesie inwestycyjnym, począwszy od rozpoznania geotechnicznego, poprzez projekt nasypu, aż po jego wykonawstwo*”. Jeszcze bardziej sugestywny w tym względzie był tytuł publikacji [3]. Dotyczyło to nawet formy druku. Początek brzmiący „*Błędy w projektowaniu*” wydrukowano mianowicie czcionką dwa razy większą niż ciąg dalszy, zawierający zwrot „*eksploatacja górnictwa*”.

Jak widać, pogląd adwersarzy na przyczyny awarii wyrażony został jasno i jednoznacznie. Głoszona teza, to jednak tylko ogólne hasła, które musiałyby być wypełnione treścią, by mogły stanowić przedmiot poważnej dyskusji. Chodzi o sprecyzowanie, jakie konkretnie

błędne decyzje podjął projektant, lub jakich uchybień dopuścił się wykonawca. Czy, w opinii autorów zbyt strome są skarpy? Czy źle dobrany pod względem uziarnienia i/lub niedostatecznie zagęszczony materiał na korpus? W cytowanych pracach [1], [2], [3] odpowiedzi na tak postawione pytania nie ma. Dowodzi się natomiast, że (cytuje za [1]): „*uszkodzenia podstawy nasypu oraz korony mogą wystąpić jeszcze przed wystąpieniem odkształceń związanych z eksploatacją*”, mówiąc inaczej pod obciążeniem samym ciężarem własnym. Podstawą tej „autorytarnej” tezy były wyłącznie wyniki obszernych studiów numerycznych zagadnienia, prezentowane w [1], [2], [3]. Dane liczbowe do analiz zaczerpnięte zostały z projektu [16].

Analiza przyczyn awarii zawarta w [1], [2], [3] ma dwa poważne mankamenty:

- 1) nie uwzględnia rezultatów obserwacji zachowania się nasypu oraz licznych pomiarów osiadań podłoża budowli i przylegającego terenu, prowadzonych systematycznie w trakcie i po zakończeniu budowy [11], [19],
- 2) neguje fakt, że tworzywo nasypu, jako silnie zagęszczony materiał okruczowy, musi się odznaczać wysokimi wartościami parametrów mechanicznych, potwierdzonymi w odniesieniu do oporu na ścinanie wynikami badań doświadczalnych [12], [13] (w następstwie przyjmowane są, jako dane do obliczeń, bardzo konserwatywne oszacowania z projektu [16]).

Niniejsza publikacja jest w pierwszym rzędzie obroną autorskiego stanowiska [7], że w procesie inwestycyjnym nie popełniono błędów, które mogłyby być współodpowiedzialne (wraz z oddziaływaniami górniczymi) za tak duże deformacje i uszkodzenia, jakie wystąpiły we wrześniu 2004 w rejonie km 330+970 autostrady A-4. Tym bardziej niewyobrażalne jest, by nasyp o nachyleniu skarpy 1:1.5, wykonany z takiego materiału i w taki sposób jak ten w rejonie km 330+970, utracił stateczność pod działaniem ciężaru własnego.

Nie byłoby, być może, dramatycznej rozbieżności stanowisk, gdyby autorzy prac [1], [2], [3] dysponowali wszystkimi wynikami dokonanych obserwacji oraz pomiarów i bacznie im się przyjrzeni. Zwięzła ich analiza zamieszczona będzie w p. 2 opracowania.

Nie byłoby też twierdzenia o niestateczności w warunkach obciążenia samym ciężarem własnym, gdyby nie bezpodstawne, poważne (w stosunku do wyników badań [12], [13]) niedoszacowanie oporu na ścinanie tworzywa nasypu w obliczeniach. W p. 3 rozważany będzie kluczowy z punktu widzenia wyników analizy stateczności nasypu dobór wytrzymałościowych parametrów jego tworzywa. Pod lupą znajdują się w szczególności kontrowersje wokół spójności.

Osobny, niezwykle ważny w aspekcie dociekania przyczyn awarii problem stanowią zabezpieczenia układu „nasyp – podłoże” przed szkodami górniczymi. Konieczność wspomaganie praktycznie niezdolnych do przenoszenia górniczego rozpełzania terenu gruntów różnego rodzaju przeponami z geosyntetyków nie jest kwestionowana. Bardzo zróżnicowane, często przeciwstawne, bywają natomiast poglądy na istotę współdziałania konstrukcji zbrojących z masywem gruntowym.

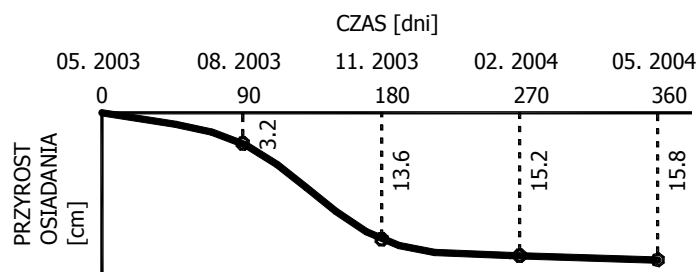
Przykładem tego może być krytycyzm prezentowany w pracach [1], [2], [3] wobec materiałów z kruszywa obleczonych geosyntetykami, zastosowanych jako zabezpieczenie przed przenoszeniem się górniczych rozpełzań podłoża II kategorii na nasyp. Na podstawie studiów numerycznych stwierdza się tam, że (cytuje za [1]): „*Ze względu na duży współczynnik tarcia pomiędzy geosiatką a gruntem oraz dużą odkształcalność zastosowanych geosiatek materac będzie się odkształcał 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*” (koniec cytatu). Autorzy wysuwają stąd wniosek, że: „*zaprojektowane i zastosowane zabezpieczenie nasypu... było niewystarczające w analizowanych warunkach geotechnicznych*”. Odmienne stanowisko, poparte wynikami obserwacji doświadczalnych przedstawione będzie w p. 4.

2. Przyczyny awarii w świetle obserwacji i pomiarów

Budowa wysokiego nasypu autostrady A-4 między km 330+700 a km 331+200 zakończyła się położeniem warstwy wiążącej asfaltu w ostatnich dniach listopada 2003. W tym stanie pozostawał obiekt do września 2004, kiedy to doszło do opisanej w [7], [11], [19] awarii. Przynajmniej do lipca 2004 systematyczna, drobiazgowo kontrola powierzchni jezdni, poboczy i skarp, prowadzona przez nadzorującą firmę Jacobs Gibb nie wykazała żadnych uszkodzeń nasypu. Przez 7 miesięcy nie było spływów, osuwisk, szczelin w masywie gruntowym, spękań asfaltu – niczego, co by wskazywało na słuszność tezy o możliwości uszkodzeń podstawy i korony nasypu, w wyniku działania samego ciężaru. Gdyby takie zdarzenia miały wystąpić, stałoby się to w momencie zakończenia budowy obiektu, czyli w grudniu 2003, lub (biorąc pod uwagę co najwyżej średnią spoistość podłoża) w krótkim okresie po jego wzniesieniu, kiedy nie rozpoczęło się jeszcze stabilizujące rozpraszanie ciśnienia porowego. Jak wspomniano, żadnych symptomów zniszczenia w tym czasie nie było. Później, każda chwila procesu konsolidacji oddalała wywołane ciężarem budowli naprężenia efektywne w podłożu od stanu granicznego. Rumoszowy nasyp był już wtedy skonsolidowany.

Zasadniczym uwiarygodnieniem powyższych „wizualnych” wniosków byłoby potwierdzenie ich wynikami odpowiednich pomiarów. Okazji ku temu dostarczył kompleksowy monitoring obniżenia terenu pod autostradą i w jej otoczeniu, w rejonach spodziewanych niecek górniczych, prowadzony od końca marca 2003, z częstotliwością co 3 miesiące. Osnowę geodezyjną tworzyły ciągi reperów równoległych do autostrady (dwa po obu jej stronach, poza pasem robót ziemnych, jeden w osi wysokiego nasypu), oraz kilkanaście poprzecznych ciągów reperów ([5], [19] rys. 1).

Kluczowy dla potwierdzenia antytezy o możliwości destabilizacji nasypu pod ciężarem własnym był przebieg procesu osiadania reperu 10 N w osi wysokiego nasypu, w km 330+900, pokazany na rys. 1. Nie jest to wynik bezpośredniego pomiaru. Ten musiał być zredukowany o średnie górnicze obniżenie terenu.

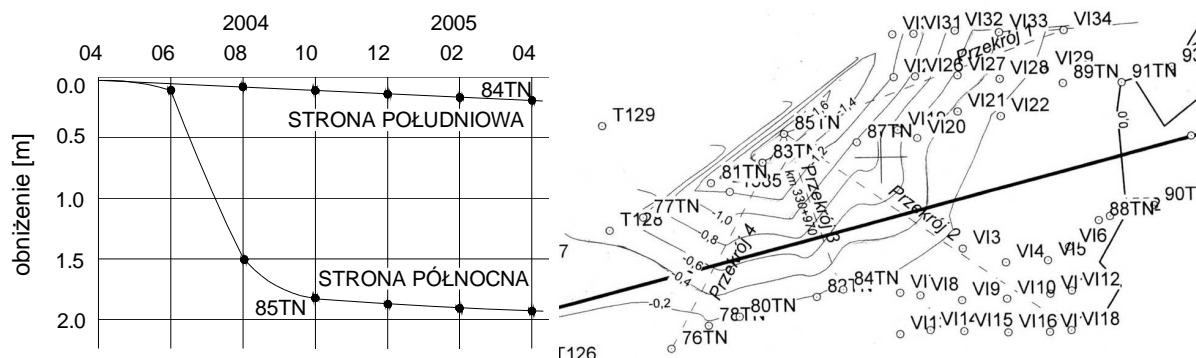


Rys. 1. Przyrost osiadania wysokiego nasypu w czasie (od maja 2003)

Gwoli ścisłości, dla uchwycenia nieskazanego wpływu ciężaru własnego trzeba by jeszcze odjąć od rzędnych, przytoczonych na rys. 1, niewielkie, niemożliwe do pomierzenia, osiadania, będące skutkiem górniczego rozluźniania podłoża w rozważanym czasie. Nawet i bez tej redukcji, z przebiegu osiadań na rys. 1 w żaden sposób nie wynika zagrożenie utratą stateczności nasypu.

W miesiącach letnich 2004 nastąpił dramatyczny zwrot – teren po północnej stronie skarpy autostrady zaczął się gwałtownie obniżać, a apogeum tego obniżenia zanotowano na reperze 85TN, usytuowanym w km 330+970, w odległości niecałe 40 m od podnóża skarpy. W ciągu trzech miesięcy od czerwca do września 2004 osiadanie w tym punkcie gwałtownie wzrosło, osiagając wartość 181 cm (sic!). Jest to de facto przyrost od pierwszego pomiaru w marcu 2003. W dalszych miesiącach obniżenie powoli rosło przekraczając w maju 2005 200 cm. Na rys. 2a pokazany został przebieg obniżenia reperu 85TN, oraz dla porównania – położonego vis à vis po drugiej stronie autostrady reperu 84 TN. Rys. 2a uświadamia skalę

zjawiska. W ciągu trzech letnich miesięcy osiadanie reperu 85 TN wzrosło aż piętnastokrotnie. Jeszcze bardziej brzemienny w skutki jest fakt, że we wrześniu 2004 osiadanie to było trzynastokrotnie większe niż osiadanie po południowej stronie autostrady. Świetną wizualizację sytuacji stanowi mapa warstwicowa, przedstawiająca nieckę obniżeniową we wrześniu 2004. Została stworzona w drodze interpolacji osiadań 54 reperów. Zasadniczą jej część centralną przytoczono na rys. 2b dzięki uprzejmości autorki mapy dr inż. Barbary Kliszczewicz.



Rys. 2. Obniżenie terenu po północnej stronie autostrady, a) przebieg w czasie kulminacji obniżenia (reper 85 TN), b) mapa warstwicowa niecki obniżeniowej – wrzesień 2004.

Wynika z tego rysunku, że wokół kulminacji w punkcie 85 TN wytworzyła się głęboka, bardzo wąska niecka o stromych brzegach i podłużnej osi odchylonej o kąt 20° od osi autostrady w kierunku północnym. Obniżenie terenu, przekraczające 1 m, miało długość 50 m i szerokość zaledwie 15 m, a najmniejszy promień wypukłej krzywizny pod południową stroną jezdni był rzędu 3.8 km. Z obrazem takim doskonale korespondują głębokie szczeliny wzdłuż południowego pobocza i jezdni, o maksymalnej rozwartości na powierzchni korony, szybko zwężające ku dołowi. Rzeczą znaną jest, że monitoring przemieszczeń w kilkunastu poprzecznych przekrojach autostrady w rejonie km 330+970, prowadzony we wrześniu i październiku 2004 z częstotliwością co 3 dni, wykazywał narastające nierównomierne obniżenia powierzchni korony drogi i żadnych poziomych przemieszczeń podstawy nasypu.

Związek wszystkich powyższych zjawisk z wydobywaniem węgla kamiennego jest oczywisty. Jego istnienia dowodzi zgodność miejsca i czasu. Intensywna eksploatacja ściany pokładu węgla, zlokalizowana dokładnie pod miejscem kulminacji niecki obniżeniowej na głębokości średnio 550 m, rozpoczęła się w maju 2004, na trzy miesiące przed awarią. Jest i wspomniana zgodność miejsca i charakteru uszkodzeń z usytuowaniem i geometrią niecki. Rozciągania korony nasypu, którego skutkiem była szeroka szczelina wzdłuż 150 m odcinka pobocza i spękania asfaltu jezdni o tym samym kierunku (udokumentowane w [19]), można było oczekiwać w sytuacji, gdy wypukła krzywizna brzegu niecki osiągała lokalnie wartości kwalifikowane do IV kategorii deformacji górniczej. Nie było natomiast we wrześniu 2004 symptomów utraty stateczności nasypu (osunięć skarp, koluwiów, podnoszenia terenu obok).

3. Niewiarygodność analiz stateczności w [1], [2], [3]

Nieukrywaną intencją publikacji [1], [2], [3] było przekonanie zainteresowanego zdarzeniem środowiska, że nie należy przesadzać z ferowaniem odpowiedzialności eksploatacji górniczej za awarię. Wszak według tych źródeł nie byłoby gwarancji stateczności wzniesionego w rejonie km 330+970 nasypu, nawet gdyby nie powstała tam żadna niecka obniżeniowa. Brak symptomów zagrożenia w siedmiomiesięcznym okresie od zakończenia budowy do rozpoczęcia eksploatacji ściany w maju 2004 był dla autorów bez znaczenia. Miażdżącym

dowodem miały być wyniki teoretycznych analiz stateczności układu „nasyp – podłoże”, pod działaniem samego ciężaru własnego nasypu.

Całość ujęto w kompleksowym studium numerycznym obejmującym sprężysto – plastyczne analizy MES [1] i MRS [2] z wykorzystaniem procedury redukcji „c - ϕ ”, oraz klasyczne obliczenia blokowymi metodami równowagi granicznej Bishopa i Janbu [2]. W [2], [3] rozważano cztery warianty parametrów geotechnicznych. Obliczenia w [1], [2], [3] spełniają postulaty eksperymentalnej inżynierii gruntowej (ESE). Warunkiem sine qua non są realistyczne (dostatecznie zgodne z doświadczeniem) oszacowania parametrów modeli gruntów. W rozważanych analizach stateczności są to parametry wytrzymałościowe: kąt tarcia wewnętrznego ϕ i spójność c.

Wspomniany miażdżący dowód „inherentnej” niestabilności układu – globalny wskaźnik stateczności $F = 1.13$ (w przypadku sprężysto – plastycznej analizy MRS) z nawet $F = 1.06$ (metoda Janbu) ustalony został w [2] przy parametrach zaczerpniętych z projektu [16]:

$$\begin{array}{lll} \phi = 25^\circ, & c = 18 \text{ kPa} & \text{dla materiału nasypu,} \\ \phi = 12^\circ, & c = 11 \text{ kPa} & \text{dla gruntu podłoża.} \end{array}$$

Nie ma żadnej wątpliwości, że wartość globalnego wskaźnika stateczności zależy w sposób zasadniczy od parametrów wytrzymałościowych materiału nasypu i w wyrażnie mniejszym stopniu od analogicznych charakterystyk gruntów podłoża. Dla potwierdzenia wystarczy porównać wskaźniki uzyskane dla różnych wariantów w [1], [2], [3]. Skoro więc wyniki obliczeń mają mieć siłę niezbitego dowodu, że błędy w procesie inwestycyjnym stanowią ważną przyczynę awarii, oszacowania ϕ i c tworzywa nasypu muszą być absolutnie wiarygodne.

Do wykonania nasypu na odcinku od km 330+850 do km 331+120 użyto ostatecznie przekruszonego zaglinionego piaskowca, pochodzącego z pobliskich wykopów. Źródłem wiedzy o fizyko – mechanicznych właściwościach materiału są badania [12], [13] na trzech dużych próbach. Dwie z nich, pobrane losowo z zupełnie różnych miejsc wykazują (po odrzuceniu okruchów o średnicach zastępczych, większych od 60 mm) duże podobieństwo, co pozwala na następujące uśrednienie parametrów: zawartość frakcji grubych (powyżej 20 mm) – ok. 52%, udział frakcji pyłowej – ok. 9% a ilowej - 3.8%, wilgotność naturalna – ok. 7.1% a optymalna – ok. 9%. Istotnie różnią się wskaźniki różnoziarnistości (425 i 1750), są jednak oba bardzo duże. Makroskopowy ogląd nasypu sugerował, że powyższe dwie próby można uznać za reprezentatywne, a przynajmniej typowe.

A oto uśrednienie parametrów wytrzymałościowych obu prób, po odrzuceniu ziaren $d_z > 60 \text{ mm}$ i zagęszczeniu metodą normalną Proctora do wskaźnika zagęszczenia 1.0 [12], [13]:

$$\phi = 39.5^\circ, \quad c = 79.4 \text{ kPa}$$

Parametry trzeciej, wyselekcjonowanej pod kątem zbadania skutków większego udziału cząstek drobnych (zawartość frakcji pyłowej – ok. 17%, ilowej – ok. 14%) są mniejsze:

$$\phi = 26^\circ, \quad c = 67 \text{ kPa.}$$

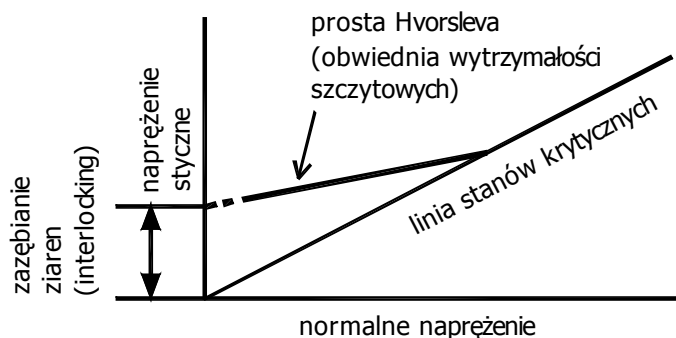
Porównując uzyskane w badaniach parametry wytrzymałościowe zastosowanego do budowy nasypu przekruszu piaskowca z przyjętymi do obliczeń w [1], [2], [3] można pomyśleć, że ma się do czynienia z całkowicie różnymi gruntami. Szokujący jest zwłaszcza stosunek spójności – ok. 4.5 . W pracy [1] tę drastyczną rozbieżność kwituje się następująco (cytuje): „Uzyskana z powyższych badań bardzo wysoka spójność budzi poważne wątpliwości. Jest ona prawdopodobnie spowodowana znanym zjawiskiem klinowania się grubych ziaren 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”. W tym kategoriycznym stwierdzeniu, które ma stanowić niepodważalne uzasadnienie przyjęcia do obliczeń bardzo niskiej spójności, a tym samym uwiarygodnienie groźby niestateczności nasypu pod działaniem samego ciężaru

własnego, podpierają się autorzy autorytetem Pisarczyka powołując się na jego książkę [15]. Uważna lektura [15] prowadzi do zgoła innych wniosków. Na str. 44 można przeczytać, że klinowaniu ziaren wzdłuż wymuszonej płaszczyzny i przy ściankach aparatu skrzynkowego zapobiega strefa ramek o wysokości co najmniej 2 razy większej od maksymalnej średnicy ziarna. W badaniach [12], [13] wymaganie to zostało spełnione. Pisarczyk przytacza, używane w aparatach bezpośredniego strefowego ściskania, wysokie „opory spójności” gruntów gruboziarnistych, m.in. $c = 56$ kPa okruchów piaskowca (rys. 5.44) i $c = 50 \div 70$ kPa ziaren tłucznia kolejowego (rys. 5.54). O tym, że duży opór spójności jest cechą materiału grubookruchowego, a nie (jak chcą autorzy [1]) skutkiem błędów związanych z procedurą badawczą, świadczy wynik badań Homand – Etienne i in. [9] gruboziarnistego gruntu o strukturze agregatowej w aparacie trójosiowego ściskania - $c = 45$ kPa. Najbardziej spektakularnego dowodu dostarczają jednak wyniki próbnych obciążeń w skali 1:1 nasypu drogowego z grubookruchowych, nieprzepalonych odpadów kopalnianych, przeprowadzonych przez Kawalca [10]. W drodze sprężysto – plastycznych analiz wstecznych zagadnień granicznych uzyskał on przy różnych nachyleniach skarpy opory spójności w granicach 43 kPa \div 55 kPa.

Jak się to ma do sugestii zawartej w cytowanym za [1] komentarzu, że w gruntach z natury niespoistych nie należy spójności uwzględniać przy obliczeniu stateczności nasypów? Rzecz w tym, co się rozumie przez spójność. W przytoczonej wypowiedzi autorzy [1] mają najwyraźniej na myśli klasyczne pojęcie mechaniki mikrostrukturalnej, czyli wzajemne przyciąganie cząstek gruntu, uwarunkowane występowaniem sił Van der Waalsa i elektrostatycznych. W stosowanym do obliczeń prawie Coulomba – Mohra jest to jednak tylko wytrzymałość gruntu na ścinanie przy zerowym naprężeniu normalnym, niezależnie od fizycznego znaczenia. Równie dobrze może to być wzajemne zazębienie się cząstek gruntu, zwane przez Parylaka [14] spójnością strukturalną. Taylor [20] uważał, że to nie spójność sensu stricto, lecz właśnie zazębienie się ziaren (interlocking) jest drugim obok tarcia składnikiem oporu ścinania.

W tym miejscu trzeba koniecznie przywołać niedawno opublikowany esej [17] o znamienym tytule: „The „Mohr–Coulomb” error”, autorstwa Andrew Schofielda, jednego z najbardziej opiniotwórczych mechaników gruntów w światowej historii dyscypliny. W pracy tej wyjaśnia autor rzeczywistą naturę „oporu spójności”. Czyni to w drodze interpretacji klasycznego prawa Coulomba–Mohra, z wykorzystaniem wyników podstawowych badań Hvorsleva i twórców mechaniki stanu krytycznego. Punktem wyjścia jest ogólnie znany fakt, że spójność właściwa tworzy się w dłuższym, bliżej nieokreślonym czasie, oraz mniej powszechna wiedza, że zniszczenie gruntów normalnie skonsolidowanych lub słabo prekonsolidowanych, związane ze stanem krytycznym i zaawansowanym plastycznym płynięciem, ma charakter czysto tarciovowy. Dowodzi tego przebieg obwiedni stanów krytycznych (CSL) w przestrzeni naprężeń efektywnych. Jest to zawsze prosta przechodząca przez początek układu (rys. 3).

Linia, którą w codziennej praktyce laboratoryjnej uważa się za prostą Coulomba–Mohra, jest w istocie obwiednią wytrzymałości szczytowych, odkrytą dla mechaniki gruntów przez Hvorsleva (gruba linia na rys. 3). Wytrzymałość szczytowa charakteryzuje wyłącznie grunty silnie prekonsolidowane. Doświadczenia wykazują, że istotnym jej składnikiem jest „opór spójności”, który powstaje i rośnie w trakcie obciążania.

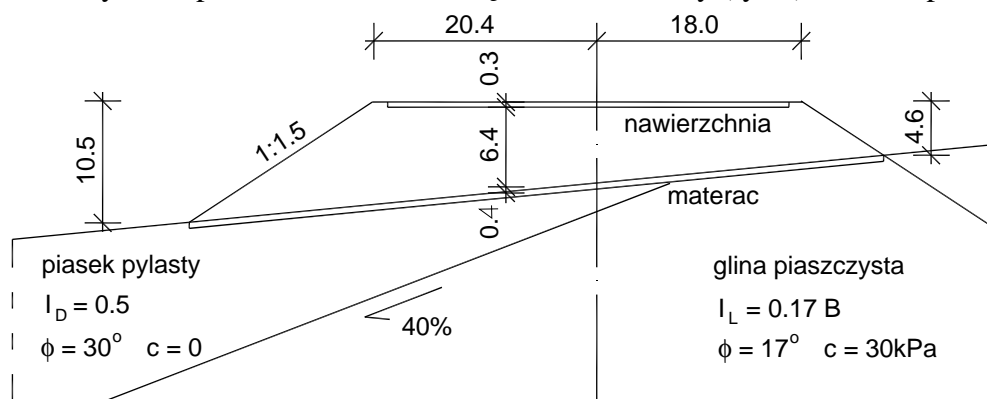


Rys. 3. Prawo Coulomba-Mohra w ujęciu Schofielda

Schofield konkluduje, że nie może być to spójność właściwa, bo ta tworzy się w długim czasie. Jest to wyłącznie zazębienie się cząstek (interlocking), które stanowi cechę uniwersalną, znamionującą zarówno grunty spoiste, jak niespoiste. Nie trzeba nikogo przekonywać, że jeśli się podda silnej prekonsolidacji materiał składający się w połowie z grubych, ostrokrawędzistych okruchów skalnych, a przy tym bardzo różnoziarnisty, odznaczał się on będzie szczególnie wysokim oporem spójności w rozumieniu Schofielda (dużym interlockingiem).

Taka właśnie była charakterystyka tworzywa nasypu autostrady A-4 w rejonie km 330+970 zagęszczanego warstwowo ciężkim walcem wibracyjnym. W świetle powyższej analizy nie istnieje żaden racjonalny powód, by oporu spójności nasypu nie uwzględnić w obliczeniach stateczności a nawet by istotnie zaniżyć jej wartość uzyskaną w badaniach w aparacie bezpośredniego ścinania [12], [13].

Wcześniej przytoczone parametry gruntów podłoża, przyjęte za [16] w pracach [1], [2], [3], odpowiadają (według PN-81/B-03020) gruntowi średniospoistemu o stopniu plastyczności $I_L = 0.4$ z grupy genetycznej C. Badania gruntów podłoża autostrady nie objęły bezpośrednich oznaczeń parametrów. Nieuniknione stało się więc wykorzystanie normowych korelacji. Nie oznacza to bynajmniej akceptacji przyjętych w pracach [1], [2], [3] wartości. Inny przede wszystkim profil układu uważa się za obliczeniowy (rys.4). Jest to przekrój pop-



Rys.4. Obliczeniowy przekrój geotechniczny

rzecznego autostrady, położony najbliżej miejsca kulminacji niecki obniżeniowej i awarii , tj. km 330+970 .

Nawet przy najmniej korzystnych wiarygodnych parametrach, tj. $\phi = 26^\circ$, $c = 67$ kPa, analiza MES, z redukcją $c - \phi$, stateczności nasypu pod ciężarem własnym daje wysoki globalny wskaźnik stateczności $F = 2.4$. Wynik ten jest adekwatny do zachowania się nasypu w siedmiomiesięcznym okresie od zakończenia budowy do rozpoczęcia eksploatacji ściany, w którym to okresie brak było jakichkolwiek oznak destabilizacji. Warto zauważyć, że w [2] podano jako wynik analogicznej analizy $F = 2.27$. Mało istotna różnica wyniknęła z nieco różniących się od siebie profili obliczeniowych i modeli geomateraca. W [2] zgodnie

z przyjętą filozofią negowania oporu spójności (interlockingu) rezultat ten został oczywiście odrzucony jako nierealistyczny.

W ramach niniejszej pracy przeanalizowano też wpływ na stateczność nasypu deformacji górniczej II kategorii. Okazał się relatywnie mały. Wartość $F = 2.3$ oznacza stan wciąż odległy od zagrożenia osuwiskiem, co potwierdziło się wspomnianym już brakiem symptomów osuwisk w czasie awarii. W świetle analiz numerycznych w pracy [1] osunięcie się skarpy północnej byłoby nieuniknione.

Rodzi się pytanie, czy zupełnie odmienny od tego, rzeczywisty obraz awarii – deformacje nieciągłe i spękania w górnej strefie nasypu bez utraty stateczności skarp, jest do uchwycenia w sprężysto – plastycznych analizach MES spełniających postulaty ESE? Odpowiedź brzmi: „tak”, lecz pod warunkiem uwzględnienia zgodnego z wynikami badań [12], [13], wysokiego „oporu spójności” tworzywa nasypu i równocześnie jego znikomej zdolności do przenoszeniaciągnięć. Takim wymaganiom może sprostać sprężysto–idealnie plastyczny model Coulomba – Mohra w wersji „cut off”, czyli mówiąc precyzyjnie model o prawie płynięcia stowarzyszonym (lub niestowarzyszonym) z powierzchnią graniczną Coulomba – Mohra, zamkniętą od strony ciągnięć płaszczyzną dewiatorową (np. $q = 0$).

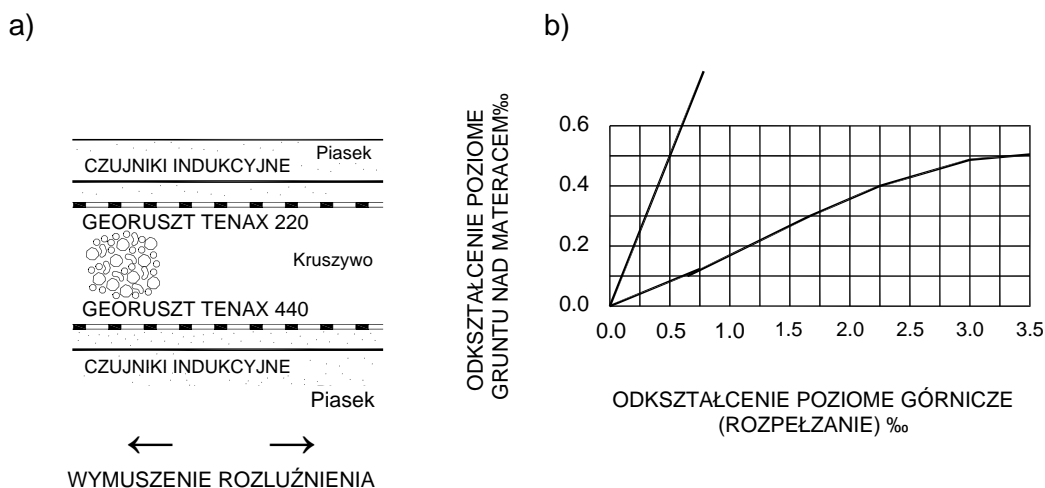
4. Problem zabezpieczeń nasypu przed awarią

Jedynym konkretnym zarzutem postawionym przez adwersarzy autorom projektu jest zarzut całkowitej nieskuteczności zabezpieczeń geomateracami. Autorzy prac [1], [2],[3] wyrokuje to na podstawie wspomnianych już analiz numerycznych, z których wynikało, że wskutek dużej odkształcalności zastosowanych geosiatek materac odkształcał się dokładnie tak jak podłoże.

Na wstępie rozważań nad adekwatnością powyższego wyniku trzeba przypomnieć odnotowany w p. 2 fakt, że prowadzone we wrześniu i październiku 2004 z dużą częstotliwością i w gęstej siatce punktów pomiary geodezyjne sygnalizowały relewantne do stanu awarii duże przemieszczenia powierzchni korony, nie wykazując żadnych ruchów poziomych podnóży skarp (końcówek materaca).

Trzeba zauważyć, że duża odkształcalność geosiatek ustalana była w [1], [2], [3] na podstawie standardowych testów rozciągania, dokonywanych w warunkach drastycznie odbiegających od tych, w których pracowały później. Aspekt znaczącego wzrostu sztywności geosiatki w wyniku klinowania się w jego oczkach ziaren kruszywa matrycy a także docisku nasypem jest silnie akcentowany w publikacji [8]. Ponadto za miarodajną przyjęto w cytowanych obliczeniach dużą odkształcalność odpowiadającą wydłużeniu 2%, tj. ok. 1.3 m na szerokości podstawy nasypu, podczas gdy wydłużenie w wyniku eksploatacji jest rzędu 0.3%, tj. ok. 20 cm. Powyższe rozważania mają znaczenie ogólniejsze, sygnalizują bowiem konieczność rewizji obowiązującego podejścia do projektowania materaców, opartego na kryterium nieprzekroczenia długotrwałej wytrzymałości zbrojenia (por. m.in. [18]). Nie trzeba natomiast po nie sięgać, by wykazać efektywność zastosowanego pod wysokim nasypem w 330+970 autostrady materaca. Trudnego do zakwestionowania dowodu dostarczają wyniki badań modelowych Chlipalskiego [4], informujące jaka część górniczego odkształcenia przedostaje się przez materac do nasypu. Poza sposobem symulacji rozpełzania na stanowisku badawczym wszystkie elementy modelu są wierną kopią w skali 1:1 konstrukcji zrealizowanej na autostradzie (rys. 5a). Zależność między odkształceniami poziomymi pod materacem i nad materacem, pokazana na rys. 5b bazuje na wynikach badań [4].

Przytoczone wyniki ukazują bardzo dużą skuteczność zastosowanego rozwiązania jako zabezpieczenia przed rozpełzaniem. Geomaterac redukuje poziome odkształcenia górnicze w sposób zasadniczy. Przedostaje się do nasypu odkształcenie, które nie przekracza 0.05% (I kategoria szkód górniczych). Warto podkreślić, że Chlipalski prowadził badania dotyczące



Rys. 5. Badania modelowe Chlipalskiego [4], a) przekrój przez materac, b) zależność odkształcenia poziomego gruntu nad materacem od wymuszenia górniczego

przepon i materaców z różnych geosyntetyków, które opublikował wykazując, że choć w różnym stopniu wszystkie one stanowią barierę dla rozpełzań. Wybór źródła ([4]) uzasadniony jest geometryczną i materiałową tożsamością badanego tam modelu z prototypem na autostradzie.

Badania Chlipalskiego nic nie mówią o zdolności rozważanego geomateraca do łagodzenia nierównomierności osiadań nasypu wskutek oddziaływania górnicznej krzywizny terenu. To, że geomaterac, jako sztywna inkluzja redukuje nierównomierności osiadań, potwierdzały inklinometryczne badania nasypu autostrady A-4, prowadzone przez Katedrę Geotechniki Politechniki Śląskiej na odcinku między węzłami „Mikołowska” i „Batorego” [6]. Badania te wykazały, że mimo stwierdzonych wpływów eksploatacji materac wbudowany w korpus autostrady pozostawał prawie płaski i poziomy.

Rodzi się oczywiście pytanie, dlaczego mimo powyższych zabezpieczeń doszło do awarii? Trzeba jednak pamiętać, że materac znajdował się kilka metrów pod obszarem nieciągłych odkształceń i uszkodzeń. Nawet małe, nie zredukowane w poziomie materaca krzywizny mogły skutkować znaczącymi rozluźnieniami w pasie korony.

Jest prawdopodobne, że lokalne zastosowanie drugiego geomateraca pod nawierzchnią uchroniłoby autostradę od awarii. Gdy jednak powstawał projekt a nawet gdy był realizowany, obowiązywała prognoza niecki o głębokości rzędu 0.6 m.

Literatura

1. Cała M., Cieślik J., Flisiak J., Kowalski M.: Przyczyny awarii nasypu autostrady A-4 pomiędzy węzłami „Wirek” i „Batorego” w świetle obliczeń numerycznych, XXIX Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii, Krynica 2006, W: „Geomechanika i Budownictwo Specjalne” Wyd. Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH, Kraków 2006, 755-770.
2. Cała M., Cieślik J., Flisiak J., Kowalski M.: Analiza warunków stateczności nasypu autostrady A-4 między węzłami „Wirek” - „Batorego”, XXIX Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii, Krynica 2006, W: „Geomechanika i Budownictwo Specjalne” Wyd. Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH, Kraków 2006, 771-783.
3. Cała M., Cieślik J., Flisiak J., Kowalski M.: Błędy w projektowaniu, a nie tylko eksploatacja górnicza przyczyną uszkodzenia autostrady, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne nr 5 (8), 2006, 26-31.

4. Chlipalski K.: Badanie wpływu geosiatki TENAX 220 i 440 na wzmocnienie konstrukcji nawierzchni poddanej górnictwu rozpełzaniu podłoża, Katedra Komunikacji Lądowej Pol. Śl., Gliwice 2002.
5. Gryczmański M. i in.: Monitoring wpływu eksploatacji górniczej na odcinek autostrady A-4 między węzłami „Wirek” – „Batorego”. Raporty I ÷ VIII, Cz. 1 ÷ 4, Pol. Śląska, Kat. Geotechniki, Gliwice styczeń 2000 – październik 2004.
6. Gryczmański M. i in.: Weryfikacja doświadczalna wzmocnień na wpływy górnicze nasypów i konstrukcji autostrady płatnej A-4 dla odcinka Gliwice – Katowice. Cz. II. Weryfikacja wzmocnienia konstrukcji nasypów i podłoża. Praca NB-211/RB-7/98. Kat. Geotech. Pol. Śl. Gliwice 1998 –2002.
7. Gryczmański M., Sternik K.: Awaria wysokiego nasypu autostrady A-4 między węzłami „Wirek” - „Batorego”, XXII Konferencja Naukowo – Techniczna „Awarie Budowlane” Szczecin – Międzyzdroje 2005, 545 – 552.
8. Gryczmański M., Kawalec J.: Analiza skuteczności geosyntetyków w materacach zabezpieczających nasypy na terenach górniczych, *Górnictwo i Środowisko*, Spec. Wyd., 2006, 105-113.
9. Homand-Etienne F., Rapin H., Song Y.: Effect of aggregates angularity on granular material behaviour, “Powders and Grains”, Balkema, Rotterdam 1989, 135-141.
10. Kawalec J.: Ocena wytrzymałości odpadów górniczych na podstawie próbnych obciążeń skarpy nasypu, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2000.
11. Kliszczewicz B.: Analiza zagrożeń kanalizacji deszczowej na odcinku autostrady A-4 między węzłami „Wirek” – „Batorego”, XXII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”, Szczecin – Międzyzdroje 2005, 579-586.
12. Kozielska – Sroka E., Michalski P.: Określenie wytrzymałości na ścinanie przekruszonego materiału skalnego w aspekcie wykorzystania go do budowy nasypu autostradowego, *Kat. Mech. Gruntów i Bud. Ziemi* Akademii Rolniczej w Krakowie, Kraków 2003.
13. Kozielska – Sroka E., Michalski P.: Określenie wytrzymałości na ścinanie przekruszonego materiału skalnego pochodzącego z wykopu MOP Halemba w aspekcie wykorzystania go do budowy nasypu autostradowego, *Kat. Mech. Gruntów i Bud. Ziemi* Akademii Rolniczej w Krakowie, Kraków 2003.
14. Parylak K.: Charakterystyka kształtu cząstek drobnoziarnistych gruntów niespoistych i jej znaczenie w ocenie wytrzymałości, Rozprawa habilitacyjna, *Zesz. Nauk. Pol. Śl., Budownictwo*, 90, 2000.
15. Pisarczyk S.: Grunty nasypowe, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
16. Projekt wykonawczy autostrady A-4, odcinek „Węzeł Wirek” – Węzeł Batorego”, km 325+232.80-km332+470.00, opracowany przez Krakowskie Biuro Projektów Dróg i Mostów „Transprojekt”. Oddział Katowice, luty - czerwiec 2000.
17. Schofield A.N.: The „Mohr – Coulomb” error, In „Mechanics and Geotechnics”, ed. M. Luong, LMS Ecole Polytechnique, Paris 1998, 23, 19-27.
18. Sobolewski J.: Uwagi co do zasad projektowania nasypów ze zbrojeniem geosytnetycznym w podstawie, w tym nasypów na terenach szkód górniczych, XXIX Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii, Krynica 2006, w „Geomechanika i Budownictwo Specjalne”, Wyd. Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH, Kraków 2006, Dodatek, 1-18.
19. Strycharz B., Chlipalski K., Grygierek M., Basiński T.: Górnicze deformacje i uszkodzenia nawierzchni autostrady A-4 między węzłami „Wirek”– „Batorego”, XXII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje 2005, 625-634.
20. Taylor D.W.: *Fundamentals of soil mechanics*, Wiley, New York 1948.