

## Válaszok Dr. Sipos András kérdéseire

Szeretném megköszönni Dr. Sipos Andrásnak, a BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék docensének a dolgozatom gondos átolvasását, támogató és elismerő bírálói véleményét és elgondolkodtató kérdéseit. A feltett kérdésekre válaszaim a következők.

1. A bevezető fejezetben említi, hogy "a kevésbé meredek lejtőn hamarabb érjük el a veszélyesebb lavinák tartományát, mint a meredekebben". Van-e összefüggés ezen megállapítás, és a 3.2. alfejezet azon kijelentése között, hogy "kisebb lejtőmeredekségénél kevesebb számú, de nagyobb lavina figyelhető meg"?

**Válasz:** Igen, szerintem érvelhetünk amellet, hogy a két megfigyelés között van összefüggés. A kísérleteimben a lavinák úgy keletkeznek, hogy a lejtő felső részére nagyon lassan (homokóra-szerűen) folyamatosan pergettem az anyagot, így ezen a tartományon a rendszer időnként megközelítette/elérte a kritikus rétegvastagságot, aminél instabillá válik, és megindul egy lavina. A 2.6(a) és 3.11(b) ábrákon látszik, hogy kisebb lejtőmeredekségnél több anyag rakható a stabil réteg ( $h_s$ ) tetejére mielőtt a rendszer instabillá válna, mivel itt  $h_c$  távolabb van  $h_s$ -től, mint nagyobb lejtőmeredekség esetén. Már önmagában emiatt is kézenfekvő, hogy kisebb lejtőmeredekségnél ritkábban, nagyobb lavinák formájában jön le a lejtőn a fenti részen konstans sebességgel rápergetett anyag. De erre még ráerősít a bevezetőben említett jelenség, miszerint egyre kisebb lejtőmeredekségnél a  $h_c$  és  $h_s$  görbék közötti tartomány egyre nagyobb része jellemezhető a „veszélyes” lavinákkal, azaz kis lejtőmeredekségnél valószínűbb, hogy a meginduló anyag a mellette/fölötte lévő tartományt is mozgásba hozza, ami tovább növeli a fenti okok miatt amúgy is nagyobb lavina méretét.

2. A (4.1) képlet az elmozdulásprofilokra illesztett függvényt adja meg. A profilok szemre egy eltolt  $\tanh(\cdot)$  függvényre hasonlítanak, mi indokolja az  $\text{erf}(\cdot)$  függvény használatát?

**Válasz:** Az osztott aljú nyíró cellában megfigyelhető széles nyírási zónákat jellemző sebességprofilok korábban több csoport is vizsgálta kísérletileg, ill. numerikusan. A számunkra legrelevánsabb két munka [Fenistein et al. PRL **92**, 094301 (2004) és Ries et al. Phys. Rev. E **76**, 051301 (2007)] összehasonlítja az  $\text{erf}(\cdot)$  és a  $\tanh(\cdot)$  függvényekkel kapott illesztéseket, és arra jut, hogy az  $\text{erf}(\cdot)$  kicsit jobban illik a kísérleti, ill. numerikus adatokra, így mi is ezt használtuk. A dolgozatom 4.1 szakaszának egyik fő célja a zóna időfejlődésének vizsgálata egy rendezetlen szemcsés rendszerből indulva. Ezt korábban egyedül Ries vizsgálta numerikusan a fent említett publikációjában. Emiatt is célszerű volt, hogy az általa használt  $\text{erf}(\cdot)$  illesztést használjuk mi is.

3. A 4.2. alfejezetben mi lehet az oka  $\sin \alpha \sin^{-1} \beta$  kísérletben tapasztalt nagyobb szórásának a numerikus szimuláció (gravitációt tartalmazó) eredményéhez képest? Ehhez kapcsolódó általános megjegyzés, hogy a dolgozatban a szerző több helyen kísérleti és numerikus szimulációkat vet össze, gyakran az eredményábrák vizuális összehasonlításával. Számomra hiányzik a hasonlóság kvantifikációja, illetve több helyen nem derül ki, hogy a kísérleti eredmények ismétlés esetén mennyire hasonlítanak a dolgozatban bemutatotthoz.

**Válasz:** A kísérleteket és azok kiértékelését Szabó Balázs doktorandusszal közösen végeztük, a numerikus szimulációkat és azok kiértékelését pedig Unger Tamás csinálta. Nem pontosan ugyanazt a kiértékelési módszert használtuk, ami könnyen okozhatja az adatok szórásában megfigyelhető különbséget. A kísérleteknél az  $\alpha$  és  $\beta$  szögek meghatározását nem automatizáltuk, hanem képelemző szoftver (imagej) segítségével magunk végeztük, így az értékek és azok hibájának meghatározása némi szubjektív elemet is tartalmazott.

A megjegyzésre reagálva: valóban, a 4.2 alfejezetben a grafikonszerű kvantitatív összehasonlításon túl több kvalitatív összehasonlító ábra került bemutatásra. Ezt az indokolta, hogy az itt tárgyalt geometriai jellegű eredmények (fénytöréshez hasonló nyírási zóna törés, ill. zóna elhajlás) bemutatását és értelmezését ezek az ábrák nagyban megkönnyítik.

4. A nyírási zónák alakjához kapcsolódó kérdés: hogyan alakul a réteghatár elhelyezkedése, ha hosszirányban a helyzete (lineárisan) változik olyan módon, hogy a kritikus magasságnál kisebb értéknél indul és annál nagyobb értéken fejeződik be? A kritikus magasság környékén is vonalszerű (a keresztmetszeten megfigyelhető) réteghatár?

**Válasz:** Ebben az esetben szerintem a réteghatár a nyírás hatására torzulni fog (nem marad egyenes), mivel a nyírási zóna a minta egyik részén a réteghatár fölé, a másik részén pedig az alá kerül. Ez azt is maga után vonja, hogy nyírás közben az anyag bizonyos helyeken feltorlódik, ami a felszín deformációjához fog vezetni (púpok, völgyek kialakulása).

5. A 4.19. ábrán a szöveg szerint a (c) panelen a numerikus szimuláció alapján várt felhasadás megjelenik. Mi lehet az oka, hogy ugyanez nem jelentkezik az (f) panelen, ami az MRI eredményeket mutatja, ugyanezen paraméterértéknél?

**Válasz:** Azt, hogy 4.19 ábra (c) és (f) paneljei különbözően néznek ki, több tényező együttesen okozza. Az egyik, hogy az ábraalírásban kicsit nagyvonalúan azt írtam, hogy a réteghatár mindkét esetben  $y_b=0,94$  cm távolságra volt a minta közepétől. Precízebben megvizsgálva látszik, hogy a (c) esetben a távolság kicsit nagyobb (kb.  $y_b=1$  cm) volt, ami elég ahhoz, hogy a két rendszer kicsit eltérő módon viselkedjen. A másik, hogy a (c) esetben a felhasadás nem szimmetrikus, a két ág erőssége nagyon különböző, azaz az egyik ág épphogy csak jelen van. A színskálát igyekeztünk úgy beállítani, hogy ez az ág is jól kivehető legyen. A felhasadás tettenérésére több kísérleti próbálkozás közül ez volt a legjobb.

6. A kísérleti elrendezések nagy számú, de természeténél fogva véges számú szemcsét tartalmaznak. Tapasztalt-e olyan jelenséget bármelyik vizsgálatánál, amely jelenség a részecskeszám véges voltával hozható összefüggésbe?

**Válasz:** Az egyik jelenség, ahol ez a kérdés igen releváns, az hengeres nyíró cellában kialakuló másodlagos konvekció esete. Megfigyelhető ugyanis, hogy az 5.9(e) ábrán látható két nyírási zóna időben nem stacionárius, hanem kicsit fluktuál, ami abban nyilvánul meg, hogy  $\omega_p$  (a felület forgási sebessége) időben ingadozik. Tehát az anyag hol az egyik, hol a másik zóna mentén csúszik meg jobban. Kérdés, hogy másodlagos konvekció eredete ezekhez a fluktuációkhoz kapcsolható-e? Vagy pedig, ha állandó rendszerméret mellett képzeletben csökkenteni kezdjük a részecskék méretét – tartva afelé a határeset felé, ahol az anyagot kontinuumként kezeljük – és ezek a fluktuációk eltűnnek, a másodlagos konvekció akkor is fennmarad? Jelenleg ezt a kérdést numerikusan vizsgáljuk. Az eddigi eredmények szerint a részecskeméretet a felére csökkentve a fluktuációk mértéke csökken, de a másodlagos konvekció erőssége nem.

Az, hogy az anyag nem kontinuum jellegű – tehát, hogy a részecskék véges mérete egy jól meghatározott méretskálát visz a rendszerbe – más esetekben is fontos lehet. Például az osztott aljú nyíró cellában kialakuló nyírási zóna szélessége függ a részecskemérettől. Jogos felvetni, hogy ha a rendszer mérete túl kicsi lenne, az befolyásolhatná az eredményt. Ezért a nyíró cella szélességét a részecskemérethez viszonyítva úgy választottam meg, hogy ez ne történjen meg. A felvetésre továbbá jó példa a siló zene jelensége is, ami nem alakult ki, ha túl nagy részecskékkel végeztem el a kísérletet.

7. A silókra vonatkozó eredményei tartószerkezeti szempontból is relevánsak. Eredményei alapján lehet megfogalmazni ajánlást tényleges silók felületi érdességével kapcsolatban?

**Válasz:** A szemcsés rendszer silóból történő kifolyásakor megfigyelhető rezonanciajelenség tárgyalásának (6.2 szakasz) végén röviden említettem, hogy korábbi munkák szerint a falak érdességének növelésével (ami ellehetleníti a periodikus “megtapad-megcsúszik” mozgást) a rezonanciát hatásosan lehet csökkenteni [Tejchman & Gudehus, Powder Tech. **76**, 201 (1993), Tejchman, Powder Tech. **106**, 7 (1999)]. A saját kísérleteimben nem változtattam a felületi érdességet, tehát ilyen irányú vizsgálatokat nem végeztem. A fent említett munkák, továbbá egy harmadik (numerikus számolást is tartalmazó) munka [Tejchman, Thin-Walled Structures **31**, 137 (1998)] megmutatták, hogy érdes felület esetén a fal mellett kialakul egy nyírási zóna, amely hatékonyan csillapítja az anyagban kialakuló nyomás pulzációkat, amik így kevésbé tevődnek át a falra, aminek következtében a szerkezet nem rezonál be. A laborkísérletekben csiszolópapírt ragasztottak a falra, a nagyméretű ipari silókban pedig bordás fémlapokat használtak. Azt találták, hogy a rezonancia hatékony elnyomására a részecskemérethez hasonló érdességre volt szükség. Ez egybevág azzal a megfigyeléssel, hogy az érdes felületű lejtőre helyezett szemcsés anyag stabilitását jellemző  $h_c$  érték akkor kezd el gyorsan csökkenni, ha lejtő felületét alkotó részecskék méretét kisebbre csökkentjük, mint a szemcsés anyag részecskeméretének fele (lásd a dolgozatom 39. oldala, és a PRE2007 publikáció 5. ábrája).

8. Lát-e lehetőséget eredményeinek geológiai, szedimentológiai alkalmazására?

**Válasz:** Ennél a kérdésnél szerintem elsősorban a nem-gömbszerű részecskék nyírás hatására kialakuló irányrendeződésére lehet gondolni. A geológiai vizsgálatoknak fontos eleme az összetett (pl. törmelékes) kőzetek összetevőinek az irányeloszlásának elemzése (lásd pl. [1]). Ebből sok információ nyerhető a kőzet történetére vonatkozóan. A geológiai minták azonban általában igen heterogének, azaz különböző méretű és alakú alkotóelemekből állnak, valamint történetük során különféle hatásoknak voltak kitéve. Tehát az alkotóelemek irányeloszlása nem egy olyan leegyszerűsített, az alapjelenségekre koncentráló folyamat során alakult ki, mint a laborkísérleteim, amelyben a minta nagyjából egyforma szemcsékből állt és egyirányú nyírásnak volt kitéve. Így tehát a kísérleti eredményeim közvetlenül nem hasonlíthatók a geológiai megfigyelésekhez. Közvetve azonban lehet mód a két rendszer összehasonlítására, pl. egy numerikus modell segítségével, ahol szisztematikusan változtatható a minta heterogenitása.

[1] D. Karátson, O. Sztanó and T. Telbisz: Preferred clast orientation in volcanoclastic mass-flow deposits: application of a new photo-statistical method, *Journal of Sedimentary Research* **72**, 823 (2002)

Budapest, 2020.08.12.

Börzsönyi Tamás