

VÁLASZ MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS BÍRÁLATRA

ÉRTEKEZÉS CÍME: Új matematikai modellek szemcsés anyagok modellezéséhez

ÉRTEKEZÉS SZERZŐJE: Dr. Oldal István

BÍRÁLÓ: Dr. Zsoldos Ibolya, MTA doktora

Köszönöm az alapos és részletes bírálatot, a bírálatban felmerült kérdésekre a válaszaimat a következőkben a bírálattal egyező szerkezetben és az abban használt számozást követve adom meg az egyes pontokon belül külön sorszámozva a kérdéseket.

2.1. Boltozódási vizsgálatok

1. kérdés: *A kísérleti berendezés tervezése, építése kinek a nevéhez fűződik, Jelöltnek volt-e ebben szerepe?*

A kísérleti eszköz eredetéről nincs pontos információ. Feltételezem, hogy Dr. M. Csizmadia Béla vezetése alatti kutatócsoport tervezte és építette korábban. A saját vizsgálataimhoz kis módosítást végeztem rajta.

2. kérdés: *A berendezéssel síkmodelleket vizsgálnak. A boltozódás síkmodellje tekinthető-e a térbeli boltozódás metszetének?*

Igen, ezzel a feltételezéssel dolgoztam ki a modellt, amit a kísérletek visszaigazoltak.

3. kérdés: *A boltozódási jelenségben van-e hasonlóság különböző méretű modellek között?*

A boltozódási jelenségek minden mérettartományban hasonlóan megjelennek, a boltozat stabilitása viszont méretfüggő. A kohéziómentes szemcsés anyagok esetében nincs stabil boltozat, így ezeknél az anyagoknál nincs olyan mérethatás, ami megváltoztatná a kifolyás tulajdonságait a mi szempontunkból, minden modellméretnél ugyanazokat a jelenségeket figyelhettük meg. A kapott eredmények a gyakorlatban alkalmazott, nagyságrenddel nagyobb silók esetében is módosítás nélkül használhatók. A silók arányai, az anyag belső és külső súrlódása van hatással a kifolyási jelenségre a mérettől függetlenül (a valós silóméretek tartományán belül).

2.2. Kifolyási vizsgálatok

1. kérdés: *A kifolyási folyamatban van-e hasonlóság különböző méretű, de hasonló geometriájú silók esetén?*

Igen, a geometriák hasonlósága határozza meg alapvetően a kifolyás folyamatát a súrlódási viszonyok mellett.

2.3. Silókifolyás diszkrét elemes modellje

1. kérdés: *Szemcsemodellként a búzaszemet 3 gömbbel modellezi. A 19. ábra szerint a búzaszem jellemző méretei 5,3 mm x 3 mm, a leírás szerint a három egymásba csúsztatott gömbből álló szemcse jellemző méretei pedig csak 4,5 mm x 2,5 mm. Miért kisebb a modell az átlagos búzaszemnél?*

A búzaszem lapos és kissé hegyes. A szélesebb oldala 3mm, a keskenyebb oldala kisebb, mi az átlagos 2,5mm szélességi méretet használtuk. A két hegyes véget nem modelleztük, hanem az

alakhoz illesztettünk gömböt, így annak a vége nem hegyes, és rövidebb lett a szemcse. Ennél pontosabban közelítő szemcsealakot, amely figyelembe veszi a lapos és hegyes alak sajátosságát is, több gömbből lehetne összeállítani.

2. kérdés: A DEM modellben merev szemcsékkel dolgozik, és a szemcsék összenyomódását a szemcsék átfedéseként értelmezi. Ez számomra irreálisnak tűnik. Mit ért a szemcsék átfedésén?

A szemcsék összenyomódása vagy átfedése elvi modellezési kérdés, összenyomódásról rugalmas test esetében beszélhetünk. A DEM merev szemcséket modellez, azaz nem számol az alakváltozással. Egy időlépésben a módszer szerint megvizsgáljuk két szomszédos elem helyzetét, ebből számoljuk, hogy mekkora átfedés van a két elem alakja között, ezt úgy kezeljük, mint egy rugalmas test esetén az összenyomódást és úgy is számolunk vele. Pontosan fogalmazva a merev testek átfedése a rugalmas testek deformációjának modellje.

3. kérdés: A (18), a (22) és a (26) összefüggésekben úgy tűnik, hogy különböző mértékegységek adódnak a baloldalra és a jobboldalon szereplő két tagra. Jól látom ezt? Ha igen, akkor mindenképpen meg kell magyarázni.

Köszönöm az észrevételt. A (18) és (22) összefüggések esetén a csillapító tagban elírás van, és a $\sqrt{\delta}$ a negyedik gyök alatt van, nem négyzetgyök. A (26) összefüggésben már jól szerepel, ott minden tag Newton mértékegységben van.

4. kérdés: A 21. ábrához szükség van magyarázatra: $t=0$ pillanatban nem mozognak a szemcsék, de a baloldali színskála szerint mégsem a 0 m/s-nak megfelelő kék színű a töltet. Az ürítésnél pedig kék színű a töltet, ami a színskála szerint éppen 0 m/s-nak felel meg. A baloldali színskála mindegyik képre vonatkozik?

A baloldali színskála mindegyik képre vonatkozik. A $t=0$ pillanatban az összes szemcse szabadeséssel mozog. Ennek oka, hogy a DEM szoftver hézagokkal tudja kitölteni a modellteret. Ezért a tényleges kifolyási vizsgálat előtt t_k időpillanatig várni kell, amíg a szabadeséssel induló szemcsék kitöltik a hézagokat és hézagmentes nyugalmi állapotba kerülnek. Ebben a pillanatban lesz kék a teljes töltet. A következő képeken a töltet nagy része kis sebességgel mozog és a kifolyónyílás környezetében van akkora sebesség, ami kéktől különböző színnel jeleníthető meg a skálán.

3.1. Kifolyási tömegáram meghatározása hengeres silókra

1. kérdés: Lát-e lehetőséget a stabil és az instabil boltozatok alakjának tényleges összehasonlítására (azaz az instabil boltozat alakjának mérésére, pl. fotón, nagysebességű kamerás felvételen, legalább síkáramlású silóknál)?

Igen, lenne rá lehetőség, nem tartottam szükségesnek, mert a parabola elegendően pontos eredményt adott, más függvény esetében több konstans is be kellett volna vezetni, ami újabb kalibrációs gondot okozott volna úgy, hogy érdemben nem javul a modell pontossága.

2. kérdés: A 3. táblázatban 10 stabil boltozatra, pontokra illesztett függvények R^2 értékei vannak feltüntetve. Az illesztett parabolák paraméterei (a , b és c paraméterek egy $f(x)=ax^2+bx+c$ formulában) ugyanazok, vagy különbözőek voltak?

A paraméterek különbözőek voltak, a boltozatok méretei és a fizikai modell beállításai is különböztek. A vizsgálat célja az volt, hogy a boltozat alakját leíró függvény típusát ellenőrizsem. A vizsgálat azt mutatta, hogy mérettől és paraméterektől függetlenül másodfokú függvénnyel megfelelő pontossággal leírható az alak.

3. kérdés: *Mi a különbség az átmeneti és az instabil boltozat között? A 29. ábrához jó lett volna egy rövid magyarázat: a nyíllal (és nyíl nélküli) görbék az egymás utáni átmeneti boltozatok?*

Az instabil boltozat csak egy időpillanatig létezik, összeomlik és a helyén újabb instabil boltozat keletkezik. Átmeneti állapotban stabil boltozatok alakulnak ki és az összeomlás után nem mozog az anyagtömeg, hanem felette egy újabb stabil boltozat alakul ki és csak az alatta lévő boltozat anyaga hullik ki, nem alakul ki áramlás. Ezt abból a célból mutattam be, hogy látható legyen a szemcsés anyag azon tulajdonsága, hogy egy boltozat összeomlása esetén azonnal kialakul egy újabb boltozat, ami erősíti az instabil boltozatokra vonatkozó hipotézist. A 29. ábrán az egymás utáni átmeneti boltozatok kialakulása látható, a nyílak a repedések terjedésének irányát mutatják a boltozat összeomlása során és ahogyan a kérdésben szerepel, igen azok az egymás utáni átmeneti stabil boltozatok.

4. kérdés: *A (33) összefüggésnél mi értelme van a boltozat magasság-szélesség arány bevezetésének? Hiszen hengeres silók esetén a boltozat magassága nem mérhető, így az arány sem. (A δ_b boltozati alaktényezőben benne marad a boltozat magassága.) A δ_b boltozati alaktényezőt inentől kezdve anyagjellemzőként feltételezi. De vannak-e erre utaló kísérleti tapasztalatok, vagy irodalmi adatok? δ_b valóban csak anyagjellemző?*

A δ_b alaktényezőt azért vezettem be, mert a boltozat magassága nem mérhető, de a kifolyónyílás átmérője igen. Így ezzel a tényezővel a kifolyónyílás átmérője elegendő a teljes alak egzakt leírására, ha másodfokú alakot feltételezünk. Irodalmi adatok nincsenek, a tényező ilyen módon definiálva korábban nem létezett. Az összefüggés levezetésekor feltételeztem, hogy anyagjellemző. A mérések során derült ki, hogy ebben a formában anyagjellemzőként használva jó eredményt ad a belőle származtatott számítási összefüggés. Így közvetetten bizonyított, hogy a δ_b anyagjellemző.

5. kérdés: *Az instabil boltozatok amint keletkeznek, azonnal össze is omlanak, és azonnal ki is alakul a következő instabil boltozat?*

A modellem szerint igen.

6. kérdés: *Mert ha nagyon rövid ideig is, de stabilak, akkor a fennállási idejüket bele kellene kalkulálni a térfogatáram meghatározásába. Minden instabil boltozat ugyanolyan méretű és alakú?*

A modellemet azzal a feltételezéssel hoztam létre, hogy az instabil boltozatok ugyan nem egyformák, de van egy átlagos boltozat, ami ezeket a variációkat átlagolja. Az átlagos instabil boltozat alakja és mérete egyértelműen definiálható a kifolyónyílás méretével és az alaktényezővel. Szemcsés anyagban a boltozat nem hasonlít az épített boltozatokra, a boltozat ebben az esetben nem egy teherviselő adott vastagságú rész, hanem a teljes anyagtömeg a teherviselő, aminek a boltozat a határfelülete. Kontinuum anyagként kezeltem a halmazt, a boltozatot zérus vastagságúnak és az összeomlásának idejét zérusnak tekintettem, ezért nem számoltam bele a térfogatáramba.

3.2. Kifolyási tömegáram meghatározása síkáramlású silókra

Észrevétel: *A levezetett új összefüggésekkel kapcsolatosan hasonló kérdések merülnek fel, mint hengeres silóknál. Egyetlen különbség az, hogy a síkáramlású siló esetében egy átlátszó falú siló nagysebességű kamerás kísérletével talán igazolni lehetne, mit is jelent pontosan az instabil boltozat, és össze lehetne vetni a geometriai paramétereiket a stabil boltozatéval. Esetleg meg*

lehetne mutatni, hogy minden instabil boltozat azonos (vagy közelítően azonos) méretű és alakú. A kutatómunka folytatásánál javaslom ezt meggondolni.

Köszönöm az észrevételt, ez lehet egy jövőbeli irány.

3.3. Sebességeloszlások eredményei

1. kérdés: A 35. ábrán az illesztett függvénynél mekkora volt az R^2 érték?

$R^2 = 0,77$

2. kérdés: Hengeres silóknál δ_b boltozati alaktényezőt hogy vette fel a saját számításoknál?

A kifolyási mérésekből határoztam meg a (38) összefüggés segítségével. Egy anyagnál ezt egyszer végeztem el az első kifolyási mérés eredményéből, a többi mérésnél már ezt használtam és ugyanazon anyag esetén nem volt szükség korrekcióra, anyagjellemzőként működött.

3.4. Tömegáram eredmények

1. kérdés: 4. táblázat tartalmazza az anyagonként meghatározott δ_b boltozati alaktényezőt. De hogyan történt a meghatározás? Analitikus modell és mérések összehasonlításából kijön az alaktényező?

Igen, a kifolyási mérésekből (anyagonként egyszer) a (38) összefüggésből számoltam.

2. kérdés: A 37. ábra magyarázatánál azt írja, hogy háromszor ismételt minden mérést, de a diagramon csak egy mérési pont van minden átmérőre. Ez a három mérés átlaga? Ha igen, akkor mekkora volt a szórás?

A kifolyási mérések esetében csak a biztonság kedvéért volt ismétlés, mert a szórás elhanyagolhatóan kicsit volt, jóval 1% alatt. Egy kifolyási mérés több ezer adatpontból állt, a 27. ábrán egy átlagos mérés eredménye látható, az ebből meghatározott lineáris illesztett függvény illeszkedése $R^2 = 0,9997$, ismétlés esetén ugyanezt a görbét és ugyanilyen illeszkedést mértünk. A 37. ábrán az ábrázolható szórás a jelölők méretén belül van, nem jeleníthető meg vizuálisan. A szórásokat mérések során a beállítások pontatlansága okozta, a 35. ábrán például a szórás oka a kézzel beállított és milliméter pontosságú résméret volt, adott beállítás esetén az ismétlés ugyanazt az eredményt adta.

3.5. Új elvű csillapítási modell DEM alkalmazás számára

1. kérdés: A modell matematikailag valóban szépen kezelhető. De van-e realitás abban, hogy az összenyomódási szakasz végpontja és a tágulási szakasz kezdőpontja között szakadás van? Tud-e így viselkedni egy anyagrészecske (szemcse) a valóságban?

Nem, egy valós szemcse esetében nincs szakadás a függvényben. Ha azonban DEM vizsgálatot végzünk, akkor időlépésenként modellezzük a folyamatot. Ennek következtében a függvény hiába folytonos pl. a Hertz-Mindlin modell esetében, a szimuláció során csak ennek a függvénynek diszkrét pontjai fognak megjelenni, azaz a modellezés során az alapfüggvénytől függetlenül szakadásosként fog viselkedni. Így a függvényem nem valós, szakadásos viselkedése nem különbözik bármelyik elvben folytonos függvénytől.

2. kérdés, észrevétel: Az (51-52) összefüggések előtt azt írja, hogy egy irányfüggetlen a és egy irányfüggő b konstanssal bontja két részre az $f(\delta)$ függvényt. De az összefüggésekben $c1$ és $c2$ konstans szerepel.

Köszönöm az észrevételt, a munka során jobbnak láttam a c_1 és c_2 konstansok elnevezést, de a szövegben benne maradt a korábbi a és b .

3. kérdés: *Egy példán látunk futási időbeli különbséget. Valóban, a harmadára csökkent futási idő nagyon jelentős. De néhány másodpercnyi futási idővel a gyakorlatban nem igazán foglalkoznak. Végzett-e nagyobb modelleken futási idő kalkulációt? A futási idő arányosan csökken (egyharmadnyi arányban) nagy modelleken is, ahol több órás, vagy esetleg több napos futási időre számíthatunk?*

Az izotróp nyomást azért választottam, mert a modell elvéből sejtettem, hogy ebben az esetben lesz a legnagyobb a különbség. Viszont az izotróp nyomás gyorsan eléri a határt, ezért van rövid futtatási idő. Később az ebből született cikk bírálói is kérték a hosszabb futtatási idejű összehasonlítást, amit nyíróvizsgálat esetén el is végeztünk. A vizsgálat jellegéből adódóan a különbség nem olyan nagy, mint izotróp nyomás esetén. Ennél a vizsgálatnál 25%-kal volt nagyobb a Hertz-Mindlin modell számítási igénye.

4. kérdés: *Felmerülhet-e DEM szimulációk gyorsítása párhuzamos programozással, vagy grafikus kártyán való futtatással?*

Igen, a DEM szimulációk gyorsítása megoldható különböző számítástechnikai eljárásokkal, a modell vizsgálatánál arra törekedtem, hogy azonos feltételek mellett történjen a számítás az összehasonlíthatóság érdekében.

5. kérdés: *Az új csillapítási modellt felajánlotta-e, hogy integrálják pl. választható opcióként a MercuryDPM DEM szoftverbe?*

Igen, a cikk megjelenése után.

Köszönöm a bírálatot, remélem, hogy a válaszok minden kérdést tisztáznak, a tézisek így elfogadhatóak és a nyilvános vita megrendezhető.

Gödöllő, 2025. 03. 25.

Oldal István

