

V Á L A S Z

Dr. Szeidl György. az MTA doktora, professor emeritus

bírálatára

Modális dekompozíció vékonyfalú rúdelemek stabilitásvizsgálatában

címmel az MTA doktora cím elnyerésére benyújtott értekezésemről

Mindenekelőtt köszönöm a bírálatot. A bírálatból kitűnik, hogy a Bíráló igen alaposan áttanulmányozta a disszertációt. A bírálat alapján sajnálattal kellett megállapítanom, hogy legjobb igyekezetem ellenére a dolgozatban szép számmal maradt pontatlanság és szerkesztési hiba.

A Bíráló konkrét megjegyzésire az alábbiakban válaszolok.



Dr. Ádány Sándor

Budapest, 2018. október 26.

Formai követelményekre vonatkozó észrevétel

Magam szerencsésebbnek véltem volna a kétoldalas nyomtatást, mivel az a kinyomtatott értekezés terjedelmét és súlyát is csökkentette volna.

Válasz

A disszertáció véglegesítése előtt magam is elgondolkodtam, vajon az 1-oldalas vagy a 2-oldalas nyomtatás volna-e a megfelelőbb? Egyértelmű előírást erre nézve nem találtam, viszont korábbi disszertációk többnyire 1-oldalas nyomtatásban készültek, ezért választottam ezt a formát.

1. észrevétel

Elvben határponti stabilitásvesztés is lehetséges a tekintett szerkezet kialakításának és a terhelési módnak függvényében.

Válasz

Egyetértek, és remélhetőleg a dolgozat nem is állítja vagy sugallja ennek ellenkezőjét. A dolgozatban bemutatott eljárások (és példák is) minden esetben egyensúly-elágazásos problémákat feltételeznek, ezért láttam célszerűnek ezt a kikötést tenni.

Ugyanakkor megjegyzem, hogy a cFSM eljárás és a mód-identifikációs eljárás tulajdonképpen az elmozdulás-mező bázisfüggvényeinek manipulációja, ezért ezen eljárások alkalmazhatóak volnának más, azaz nem egyensúly-elágazásos problémákra is.

2. észrevétel

A bevezetés végén hiányoltam egy az irodalmi előzmények bemutatását és ennek kapcsán egy olyan célkitűzésféle jegyzéket.

Válasz

A disszertáció készítésének elkezdésekor szembesültem azzal, hogy a terjedelmi korlát betartása nehézséget fog okozni, és kompromisszumokra lesz szükség. Az észrevételben hiányolt részt elhagyhatónak ítélt meg, de természetesen elfogadom, hogy hasznos lett volna.

3. észrevétel

Jó lett volna itt is utalni arra, hogy (a) a teher egyparaméteres (b) és ehhez kötődően továbbá arra is, hogy mi a teher fizikai jelentése Másként fogalmazva: a szövegben terhelésként megadott "given axial stress distribution" egyparaméteres?

Válasz

A dolgozatban bemutatott eljárások és példák is minden esetben egyparaméteres terhet feltételeznek. Ennek egyértelmű kijelentése sajnos kimaradt a dolgozathoz. A teher fizikai tartalma a dolgozatban tárgyalt esetekben mindig olyan, hogy a rúd központosan vagy külpontosan nyomott, vagy tisztán hajlított. Ugyanakkor megjegyzem, hogy a cFSM eljárás és a mód-identifikációs eljárás érdemben nem függ a terheléstől, tehát elvileg alkalmazható volna más terhelési esetekre is.

4. észrevétel

A (2.6) egyenlettel kapcsolatos magyarázat nem pontos, mivel a legutóbbi képlet nem helyettesíthető közvetlenül a (2.4) összefüggésbe, a végeredmény azonban korrekt.

Válasz

Az észrevétel jogos. A levezetés néhány közbenső lépését kihagytam, feltételezve, hogy az olvasó ezek nélkül is megértheti azt.

5. észrevétel

Mi a garancia arra, hogy az $\mathbf{R}_M$ oszlopai lineárisan függetlenek a vonatkozó $nDOF$ méretű térben?

Válasz

Úgy kell előállítani $\mathbf{R}_M$ -et, hogy oszlopai lineárisan függetlenek legyenek. A dolgozat későbbi részeiből (remélhetőleg) kiderül, hogy a javasolt előállítási mód olyan $\mathbf{R}_M$ mátrixokra vezet, melyek oszlopai lineárisan függetlenek.

6. észrevétel

A 13. o. második sorában megjelenik egy definiálatlan fogalom: "the cross section is in transverse equilibrium".

Válasz

A "the cross section is in transverse equilibrium" fogalom első megjelenésekor valóban nincs definiálva, sőt, még csak utalás sincs arra, hogy később hol jelenik meg a fogalom. Ez sajnálatos hiba. A fogalom valójában arra vonatkozik, hogy a keresztmetszethez definiálunk egy ún. „ekvivalens tartó”-t, amely általában egy törtvonalú többtámaszú folytatólagos tartó, ahogy ezt a 21. oldal ábrája igyekszik is bemutatni, illetve ahogy azt a B7. függelék részletesen is leírja, és a „keresztmetszet egyensúly”-a valójában az „ekvivalens tartó egyensúlyá”-t jelenti.

7. észrevétel

Mi indokolja, hogy ilyen feladat (mármint: elágazásos keresztmetszet) nem szerepel példaként? Apropó, lehet több elágazási pont is egy keresztmetszeten?

Válasz

Az elágazásos keresztmetszetek kezelése fontos újdonsága volt a cFSM eljárásnak, mert a cFSM kidolgozásakor (2004-ben) ilyen keresztmetszeteket a cFSM „versenytárs”-ának tekinthető ún. „generalized beam theory” nevű eljárás (GBT) nem tudott kezelni (vagy legalábbis nem volt publikálva). A disszertációban terjedelmi okból nem szerepel ilyen keresztmetszet a 2. fejezetben, de szerepel elágazásos keresztmetszet a 3. fejezetben.

A 2. fejezetben bemutatott eredeti cFSM elvileg tetszőleges nyitott keresztmetszetet tud kezelni, azaz az elágazási pontok száma nincs korlátozva. (Az eljárás be van építve a CUFSM programba. Ott sincs korlátozás a keresztmetszet alakjára nézve. Nem tudok arról, hogy a beépített eljárás bizonyos keresztmetszeteket ne tudna kezelni, de valószínűnek tartom, hogy lehet olyan elvi keresztmetszetet definiálni, mondjuk nagyon nagy számú elágazási ponttal, melyet az eljárás – numerikus hibák miatt – nem jól kezelne.)

8. észrevétel

(2.35) kinematikai jellegű kényszeregyenlet esetén nincs megadva a szövegben a $\mathbf{B}_{vr}$ mátrix szerkezete, felépítése. Mi ennek az oka?

Válasz

Meglehet, a szöveg az adott helyen túl tömör, és a jelölések is lehetnének még explicitebben megmagyarázva. A (2.35) egyenlet tartalmilag nagyon hasonló a (2.32) egyenlethez. Mindkettő a redundáns és nem-redundáns hosszirányú szabadságfokok közötti kapcsolatot adja meg, de a (2.32)-es egyetlen elágazási csomóponthoz kapcsolódó csomópontokra vonatkozóan, míg a (2.35)-ös egyenlet a teljes keresztmetszetre vonatkozóan. A (2.35)-ben szereplő $\mathbf{B}_{vr}$ tehát a (2.32)-ben szereplő $(\mathbf{B}_{22}^{-1} \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_{11} - \mathbf{B}_{22}^{-1} \mathbf{B}_{21})$ mátrixokból van kompilálva, azaz $\mathbf{B}_{vr}$ megfelelő soraiba-oszlopaiba beírjuk a $(\mathbf{B}_{22}^{-1} \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_{11} - \mathbf{B}_{22}^{-1} \mathbf{B}_{21})$ megfelelő elemeit (teljesen hasonlóan, mint ahogy pl. egy szerkezet merevségi mátrixát kompiláljuk a végelemek merevségi mátrixaiból).

Bár a $(\mathbf{B}_{22}^{-1} \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_{11} - \mathbf{B}_{22}^{-1} \mathbf{B}_{21})$ kifejezés bonyolultnak látszik, az eredmény valójában egy kicsi, $r \times 3$ méretű mátrix, ahol r az adott elágazási ponthoz kapcsolódó redundáns csomópontok száma, amely gyakorlati esetekben ritkán nagyobb, mint 2.

9. észrevétel

A 21. oldal "Criterion #2(b) requires equilibrium of the transverse stress resultants of any cross section." mondatát nem egészen értem - a rúd tengelyvonalára merőleges feszültség-összetevők nyíró feszültségek, ezek eredője a nyíróerő (transverse stress resultant). Milyen speciális feltétel vonatkozik a szokott feltételek mellett ezekre az eredőkre?

Válasz

A disszertációban szereplő hivatkozott megfogalmazás – ezek szerint – sajnos félreérthető. A kérdéses szöveg valójában a „keresztmetszeti egyensúly”-ra vonatkozik, azaz az ekvivalens tartó egyensúlyára, melyben – az ekvivalens tartó előállításának megfelelően – csak a keresztmetszet keresztirányú hajlítása, illetve az ebből származó feszültségek szerepelnek, azaz a vékonyfalú szerkezeti elem lemezelemeiben fellépő membrán nyíróerők éppen hogy ki vannak zárva. Azt hiszem, a félreérthetőség annak a káros következménye, hogy a „keresztmetszet (keresztirányú) egyensúlya” kifejezés nem lett időben megmagyarázva a dolgozatban (ahogy ezt már a 6. észrevétel is kifogásolta).

10. észrevétel

Milyen fizikai gondolat áll a 25.o. "... the integral of the warping distribution over the whole cross section should be zero" mondatrész követelménye mögött?

Válasz

Praktikusan előnyös ezt a feltételt alkalmazni, mert így a merevtestszerű keresztmetszeti elmozdulásokhoz tartozó hosszirányú eltolódások (azaz: „warping”) eloszlásai ortogonálisak lesznek az ún. axiális módhoz tartozó eloszlásra. (Gyakorlatiasabban mondva: a hajlítások és csavarás „tisztá hajlítás” és „tisztá csavarás” lesz.)

11. észrevétel

Hiányzik a szövegből a "mode space" - talán alak térnek lehetne fordítani - fogalom pontos matematikai definíciója.

Válasz

A „mode space” fogalom általánosan valóban nincs definiálva, és elfogadom, hogy talán segítené az olvasót, ha a fogalom első előfordulásakor expliciten is definiálásra kerülne. Ugyanakkor, a disszertációban egész alfejezetek foglalkoznak a különböző „mode space”-ek leírásával, definíciójával, előállításával, tehát a dolgozat egészét tekintve – megítélésem szerint – egyértelmű a fogalom jelentése.

A „space” általában egy lineáris teret jelent a dolgozatban, melyet a diszkretizált feladat elmozdulási szabadságfokai határoznak meg. Az összes szabadságfok által meghatározott deformációs tér alterei lesznek a dolgozatban tárgyalt G , D , L , vagy G_A , G_B , G_T , stb. terek, melyekben a rúdelem elmozdulásai/deformáció valamilyen értelemben speciálisak, valamilyen speciális „mód” szerintiek. Összefoglaló néven tehát ezek az alterek vannak a „mode space” kifejezéssel jelölve.

12. észrevétel

A torzulási móddal (distorsional mode) kapcsolatos ortogonalitási feltétel - (2.51) képlet - egyben definíciónak is vehető? Hiszen meghatározza az ún. D tér elemeit.

Válasz

A képlet a definíció része. Akkor határozza meg egyértelműen a D teret, ha egyéb feltételek is teljesülnek, pl. ha kikötjük a keresztirányú nyúlások és membrán nyírási deformációk zérus voltát, stb., lásd pl. a 2.1 táblázatot.

13. észrevétel

A 2.9. ábra függőleges tengelyén álló P_{cr}/P_y hányados pontos jelentése sem a szövegben, sem a jelölés jegyzékben nem szerepel. Hiányzik a "buckling length" értelmezése is. Ez támaszfüggő mennyiség, és valamit kellett volna róla itt mondani.

Válasz

A P_{cr}/P_y hányados definiálása sajnos elmaradt. Bár úgy vélem, a hányados számlálójában szereplő P_{cr} viszonylag egyértelműen beazonosítható, a nevezőben szereplő P_y -t mindenképpen explicit módon kellett volna definiálni. P_y a keresztmetszet rugalmas (=képlékeny) teherbírása tiszta húzás-nyomás esetén, vagyis 'terület' $\times$ 'folyási feszültség'.

A „buckling length” fogalom a stabilitásvesztési alak jellemző félhullámhossza. Úgy véltem, meglehet tévesen, hogy ez a fogalom széleskörűen ismert, ezért külön definíciót nem igényel.

14. észrevétel

A másodlagos nyírás figyelembevétele egy lemezen belül több sáv meglétét igényli. Van ezeknek a sávoknak optimális száma? A másodlagos nyírás hatása tényleg szignifikáns a stabilitásvesztés tekintetében?

Válasz

A másodlagos nyírás hatása feladatfüggő. Tipikus esetekben kicsi a jelentősége, és a gyakorlati tapasztalat szerint néhány sáv elegendő egy lemezen belül. Hogy létezik-e a másodlagos nyírás szempontjából optimális sáv-szám, ezt nem vizsgáltam, illetve tudomásom szerint mások sem vizsgálták. (Megjegyzendő, hogy a disszertációban tárgyalt vékonyfalú rúdelemek viselkedése szempontjából a lemezhorpadás jelensége alapvető fontosságú, és a lemezhorpadás megfelelő pontosságú számítása miatt mindenképpen legalább 4-5 sáv alkalmazása szükséges egy lemezelemen belül, tehát pusztán a másodlagos nyírás, avagy másodlagos keresztirányú alakváltozás miatt nem szükséges sűrűbb diszkretizáció.)

Megjegyzem, hogy a lemezsíkban létrejövő nyírási alakváltozás szerepe bizonyos esetekben jelentős, például ha a rúdelem egy vagy több alkotólemezában jelentős mennyiségű lyuk van (ami fennáll pl. az ún. „slotted” hidegen hajlított acélprofilok esetén, vagy a raktárakban elterjedten használt – szintén hidegen hajlított acélból készült – állványrendszerek oszlopelemei esetén). A lyukak modellezése és hatása a disszertáció témáján kívül esik, de az utóbbi néhány évben én is foglalkoztam lyukgyengített szelvények modális dekompozíciójával.

15. észrevétel

Lehet a másodlagos nyírás a keresztirányú koordinátának lineárisnál magasabb rendű - pl. kvadratikussal - függvénye?

Válasz

Ha a vizsgált vékonyfalú rúdelem alkotólemezeit nézzük, akkor a másodlagos nyírás nem-lineáris (épp ezért van szükség a másodlagos nyírásra, illetve a lemezelemen belüli diszkretizációra). Ha egy véges sávot nézünk, akkor a jelenleg használt interpolációs függvényekkel a nyírási alakváltozás keresztirányban nem tud lineárisnál magasabb fokú lenni. Más, keresztirányban magasabb fokszámú interpolációs függvény alkalmazásával elvileg lehetséges volna lineárisnál magasabb fokszámú nyírási eloszlást követni egy véges sávon belül is.

16. észrevétel

Van-e egyszerűen algoritmizálható algoritmus a kinematikailag túlhatározott egyenértékű rúdszerkezet esetén - v.ö. 41.o. - a $\tilde{p}$ meghatározására?

Válasz

A dolgozatban azt állítom, hogy erre „nincs egyszerű, de általános eljárás” (41. oldal tetején), amit úgy értek, hogy „szemrevételezéssel”, vagy „mérnöki érzékkel”, vagy egyszerű explicit számításokkal nem mindig lehet biztosan eldönteni a túlhatározottság kérdését, ugyanakkor a hivatkozott bekezdés végén azt is említem, hogy „numerikus vizsgálat”-tal a probléma megoldható.

Mínt hogy a cFSM eljárást implementáltam a CUFSM programba, szükségképpen a lineárisan független elsődleges nyírási módok számát is meg kellett határozni. Ezt közvetetten határoztam meg, a (3.24) egyenlet, vagy a hasonló (3.26)-(3.29) egyenletek megoldásával. A CUFSM program MatLab környezetben íródott, a cFSM eljárást is MatLab-ban implementáltam. A hivatkozott egyenletek tulajdonképpen ortogonalitási feltételek, melyek előnyösen megoldhatóak a MatLab 'null' függvényével, mely függvény egy mátrixban megadott lineáris tér null-terének ortogonális bázisát állítja elő. (A 'null' függvény programozásának részleteit nem ismerem, de a MatLab 'Help' szerint a 'null' függvény a mátrix szinguláris értékek szerinti felbontásán alapszik.)

17. észrevétel

Az észrevétel lényegében megegyezik a 6. észrevétellel, a válasz is ott szerepel.

18. észrevétel

Az $(\mathbf{R}_M^n)^T \mathbf{O} \mathbf{R}_M^n$ típusú valós mátrixok diagonalizációjának az a feltétele a valós számtérben, hogy a mátrix szimmetrikus legyen. Mindig teljesül ez a feltétel? Ha a vonatkozó sajátérték feladatnak egybeeső sajátértékei vannak, akkor a főirányok nem egyértelműek. Ez gyakran előfordul?

Válasz

Az első kérdésre az a válasz, hogy igen, hiszen az alkalmazott **O** mátrixok maguk szimmetrikusak. Ez az A jelű mellékletből kiderül, bár sajnos explicit módon az **O** mátrixok szimmetrikus volta nincs említve.

A második kérdésre az a válasz, hogy ezt a kérdést közvetlenül nem vizsgáltam. A kérdést azért nem vizsgáltam, mert megítélésem szerint nincs (vagy alig van) gyakorlati jelentősége. Az egyes bázis-függvénynek önmagában igen ritkán van szerepe, sokkal fontosabb az adott altér bázisfüggvényeinek együttese, és ebből a szempontból közömbös, hogy bizonyos elemei a bázis-rendszernek nem egyértelműek.

Nyilvánvaló, hogy vannak olyan esetek, amikor egybeeső sajátértékek vannak. „Érzésem szerint” ez az eset a gyakorlatban szinte csak akkor fordul elő, ha a keresztmetszet nagyon szabályos (pl. négyzet alakú zártszelvény).

19. észrevétel

A $\kappa_x \kappa_x$ szorzat nem fajlagos energia dimenziójú mennyiség a (3.41) képletben. Mi indokolja a "strain energy content" kifejezés használatát?

Válasz

Az adott kifejezés önmagában valóban nem energia dimenziójú. A disszertáció adott szakasza arról szól, hogyan lehet egy altér bázisfüggvényeit valahogyan – gyakorlatilag ésszerű módon, de automatikusan – sorba rendezni. A javaslat az, hogy a bázisfüggvényhez tartozó alakváltozási energia alapján történjen a sorba rendezés. (Megjegyzendő, hogy a sorba rendezés számos feladat esetén elvileg szükségtelen, de ha például adott feladatok esetén megelégszünk közelítő megoldással, akkor a sorba rendezés megmondja, hogy melyek a tipikus feladat esetén „fontosabb” és „kevésbé fontos” bázisfüggvények.)

A hajlított lemezben felhalmozódott alakváltozási energia keresztirányú hajlításhoz tartozó része arányos a $\int \kappa_x \kappa_x ds$ mennyiséggel. Minthogy az adott kifejezés csak a különféle deformációkat akarja sorba állítani, az alakváltozási energia konkrét értéke közömbös, így elegendő a $\int \kappa_x \kappa_x ds$ (vagy ehhez hasonló) kifejezések értékeit számítani.

Ugyanakkor, a szóhasználat annyiban pontatlan, hogy fenti példában említett kifejezés csak az alakváltozási energiának a keresztirányú hajlításhoz tartozó részével arányos, nem pedig a teljes alakváltozási energiával. Nyilván lehetőség volna valóban a teljes alakváltozási energiát alkalmazni a deformációk sorba rendezésére. A sorbarendezés kérdése relatíve csekély jelentőséggel bír, eddig nem merült fel gyakorlati igény erre a változtatásra.

20. észrevétel

(Az észrevétel arról szól, hogy a dolgozat néhol nehezen érthető a szerző publikációinak ismerete nélkül.)

Válasz

Teljes mértékben egyetértek a bíráló azon véleményével, hogy követelmény, hogy a „benyújtott értekezés önmagában teljesen érthető és áttekinthető legyen”. Igyekeztem eszerint

készíteni a dolgozatot. Az értekezésre vonatkozó területi korlát ugyanakkor az „önmagában érthetőség” követelményével ellentétes, és sajnos előfordulhat, hogy a tömörségre való törekvés néhol az érthetőség rovására ment.

21. észrevétel

A fejezet numerikus eredményei lényegében csuklós (pinned-pinned) megtámasztásra vonatkoznak. A gondolatmenet azt sejteti, hogy más megtámasztási esetekre is érvényesek az alapvető eredmények. Ez milyen mértékben áll fenn, és ha részlegesen áll fenn, akkor melyek a korlátok?

Válasz

A 4. fejezetben valóban csak csuklós-csuklós példák szerepelnek, és az is igaz, hogy a bemutatott mód-identifikációs eljárás alkalmazható más megtámasztás esetén is. Más megtámasztásokkal is foglalkoztunk, erre a 4. fejezet vége utal is, de az egyéb megtámasztásokat a disszertáció szándékosan nem tárgyalja, mert ebben a munkában az én részvételem nem volt elsődleges, ezért nem kívántam tézist megfogalmazni.

Egyébként a tapasztalat azt mutatja, hogy az adott cFSM bázisfüggvények jól alkalmazhatóak minden olyan megtámasztásra, amelyek „szigorúbbak” a csuklós megtámasztásnál, viszont önmagukban nem jól használhatóak, ha a megtámasztás „megengedőbb”, mint egy csukló. Amennyiben azonban a cFSM bázisfüggvényeket megfelelően kiegészítjük, akkor a módszer jól alkalmazható tetszőleges megtámasztás esetén.

22. észrevétel

A 4.4. ábra - 69.o. - második diagramján jelentős szórás is előfordul az eredmények tekintetében. Az ábra feletti szöveg utal erre, de a magyarázatot nem vélem elég kielégítőnek, mivel jelentős különbségek is megjelennek. Valóban ilyen nagy szerepe lehet a VEM eredményeket illetően a feltehetően egymásra szuperponálódott félhullám hosszaknak?

Válasz

Úgy vélem, a cFSM „pontos” mód-identifikációja és a VEM eredmények közelítő identifikációja közötti különbségek két okra vezethetőek vissza.

Az egyik ok a bíráló által is említett: a VEM eredmények között vannak olyanok, amelyek kívül esnek az adott FSM-implementáció értelmezési tartományán, ezeket az eseteket a cFSM bázisfüggvények csak közelítően képesek kezelni.

A másik ok a következő. Az adott mód-identifikációs eljárás óhatatlanul elsősorban az identifikálandó elmozdulásvektor legnagyobb abszolút értékű elemei alapján határozza meg a „legjobb” lineáris kombinációt, hiszen az elmozdulásvektor közelítésének hibáját minimalizálja. Gyakorlati esetekben a legnagyobb abszolút értékű vektorelemek eltolódások, jellemzően a lemezelemekre merőleges eltolódások. A 69. oldal példája egy C-szelvényű nyomott rúdelem, mind az L, mind a D módok esetén jelentős a gerinclemez hasasodása (azaz lemezsíkra merőleges eltolódása), mely hasasodásnak még az alakja is igen hasonló a D és L módokban, következésképpen az eljárás néhol „nehezen tud” különbséget tenni az L és D módok között. A hivatkozott 4.4. ábrán jól látható, hogy az eredmények szórása csak abban a hossztartományban jelentkezik, ahol a viselkedés döntően L és D.

23. észrevétel

(Az észrevétel azt taglalja, hogy az 5. fejezetben bemutatott levezetés nem eléggé precíz és/vagy nem eléggé érthető. Ennek kapcsán konkrét kérdéseket is megfogalmaz.)

Válasz

Természetesen elfogadom, hogy a Bíráló által alkalmazni javasolt tárgyalásmód korrekten alkalmazható lett volna az 5. fejezetben bemutatott levezetésekre. Nem vitatom azt sem, hogy számos potenciális olvasó számára jól, sőt, a disszertációhoz képest jobban érthető is lett volna. Ugyanakkor véleményem szerint az általam alkalmazott tárgyalásmód is korrekt, és pontosan ugyanarra az eredményre vezet, mint amire a bíráló által javasolt tárgyalásmód – megfelelő elhanyagolásokkal – vezetne (ahogy ezt alább igyekszem igazolni). Továbbá, megítélésem szerint az általam alkalmazott tárgyalásmód a nemlineáris mechanikában kevésbé jártas olvasók (és itt nem csak a disszertáció olvasói, hanem a disszertáció háttérét képező korábban publikált cikkek olvasóira is gondolok) számára talán könnyebben érthető. Végül, az általam közölt megoldás levezetésének egy konkrét és elég speciális oka volt (ahogy ezt mindjárt kifejttem).

Az 5. fejezetben bemutatott megoldás háttere az, hogy amikor a cFSM eljárást implementáltam a CUFSM végessávós programba, akkor lehetővé vált sokféle, akár extrém feladat megoldása is. Például lehetővé vált a vékonyfalú rúdelem globális stabilitásvesztésének számítása (pl. síkbeli kihajlás). Előzetes várakozásom természetesen az volt, hogy a cFSM eljárás ilyen esetben visszaadja a jól ismert klasszikus megoldásokat (síkbeli kihajlás esetén pl. az Euler-képlet eredményét). Minthogy ez nem teljesült, igyekeztem megtalálni a cFSM és a klasszikus megoldások közötti eltérések okait. Ezen oknyomozáshoz jó eszköznek tűnt, ha a CUFSM program feltételrendszerét (és adott esetben szóhasználatát) szorosan követő analitikus megoldást adok globális stabilitásvesztésre.

Talán érdemes azzal kezdeni a CUFSM program bemutatását, hogy a CUFSM program a hidegen hajlított acél profilok vizsgálatában széleskörben alkalmazott célprogram. Az USA-ban majdhogynem a szabványos méretezési eljárás része. Mechanikai szempontból egy nagyon speciális feladatot old meg, de azt nagyon hatékonyan (azaz a felhasználótól minimális mennyiségű inputot igényel, az eredményeket érdemi várakozási idő nélkül szolgáltatja, és olyan formában, hogy az közvetlenül felhasználható szabványos méretezési eljárásban). A CUFSM alapvető célja kritikus teherparaméterek meghatározása vékonyfalú rúdelemekre. A CUFSM specialitása, hogy csak hosszirányú rúdvégi megoszló terhet lehet megadni, és csak ezt tudja kezelni, mindig azt feltételezve, hogy a rúd két végén ugyanolyan eloszlású, de ellentétes irányú terhelés hat (leggyakrabban a központos nyomásnak vagy tiszta hajlításnak megfelelő eloszlású megoszló terhet). A CUFSM program nem végez elsőrendű számítást, nem számol feszültségeket sem, hanem a priori feltételezi, hogy a rúd hossza mentén minden keresztmetszetben a rúdvégi tehereloszlásnak megfelelő hosszirányú normálfeszültség működik. Ugyanezen okból a sávok geometriai merevségi mátrixának elemei előre megadhatóak igen egyszerű analitikus kifejezésekkel, hiszen csak egyfajta, nagyon egyszerű erőrendszer működhet a sávban. Szintén specialitás, hogy az eredeti CUFSM verzióban (CUFSM 3 verzióig bezárólag, mely a cFSM kifejlesztésekor az aktuális CUFSM verzió volt) nincsenek a felhasználó által definiált megtámasztások sem. Implicit módon csuklós-csuklós támaszokat lehet megtámasztásnak gondolni, de ez csak abban jelenik meg, hogy a feltételezett bázisfüggvények hosszirányú eloszlása leginkább a csuklós-csuklós

megtámasztásnak felel meg. A CUFSM számításának talán leghelyesebb értelmezése az, hogy amikor a CUFSM program kiszámít egy kritikus teherértéket, az nem egy valódi rúdelemhez tartozik, hanem egy fiktív feladat megoldása, ahol ismert a keresztmetszet, ismert a rúdmentén állandó belső erőrendszer (mely csak hosszirányú fajlagos erőből áll), és ismert a stabilitásvesztéshez tartozó jellemző félhullámhossz (azaz „buckling length”).

Az 5. fejezetben bemutatott levezetésnél én az ún. energia-módszert követtem, mely tudomásom szerint a szerkezet-építőmérnöki gyakorlatban széleskörűen elfogadott és alkalmazott módszer. Ennek megfelelően alkalmazom a belső és külső potenciál fogalmait, az előbbi a rugalmas alakváltozási energia, az utóbbi pedig a terhelés által a másodrendű elmozdulásokon végzett munka ellentettje. Ha figyelembe vesszük a CUFSM specialitásait, úgy vélem, az energia-módszeres megközelítés nagyon jól alkalmazható, és alapszintű mechanikai ismeretek birtokában is könnyen érthető. Ráadásul a CUFSM háttérét képező dokumentáció is ezt a megközelítést használja.

Amennyiben figyelembe vesszük a CUFSM speciális feltételrendszerét a Bíráló által javasolt tárgyalásmódban, úgy vélem, pontosan arra az eredményre jutunk, mint amit a disszertáció is közöl. A CUFSM speciális teherfeltételezése miatt nem igazán van szükség a Green-Lagrange tenzor elemeire, elegendő csak a hosszirányú alakváltozással foglalkozni, és amennyiben csak kritikus teherparamétert kívánunk számítani, elegendő csak a nemlineáris tagot tekinteni. Amikor a külső-belső erőkről beszélünk, a CUFSM feltételrendszerében nehéz érdemi különbséget tenni a kettő között: pl. a munkavégzés esetén tekinthetem úgy is, hogy a rúdvégi külső erő végez munkát a rúd hossza menti (a másodrendű alakváltozási tagok figyelembe vétele miatti) eltolódáson, de természetesen tekinthetem úgy is, hogy a belső erők végzik a munkát. Mindenesetre mindenképpen igaz, hogy a bírálatban (1)-el jelölt bekeretezett képlet 2. tagjaiban az 'S' mennyiséget a CUFSM-ben nem az alakváltozásokból számítjuk, hanem feltételezünk egy belső erőeloszlást, ami viszont megegyezik a külső terheléssel, azaz formailag a képletben valóban megjelenik a külső teher.

Fentiek alapján a konkrét megjegyzésekre és kérdésekre a válaszaim a következők.

a) A bírálatban (1)-el jelölt bekeretezett képlet 2. tagja pontosan megegyezik a disszertáció (5.11) és (5.13) képleteivel, amennyiben az (1) képletben bevezetjük a fenti egyszerűsítéseket. Az azonban igaz, hogy a teljes potenciális energia egészben nincs kiírva a disszertációban, ami talán nem szerencsés.

b) Úgy gondolom, hogy a bírálatban (1)-el jelölt bekeretezett képlet 1. tagja pontosan megegyezik a disszertáció (5.13) képletével, amennyiben az (1) képletben bevezetjük az alkalmazott feltételrendszert.

b) 1. megjegyzés: Általában nyilván nem igaz, hogy $\sigma_y = p_y$, de az alkalmazott feltételrendszer szerint ez mégis igaz.

b) 2. megjegyzés: Az adott alkalmazásban a Hooke törvényt csak a sáv rugalmas merevségi mátrixának levezetésénél használjuk. Ekkor viszont az alakváltozásoknak csak a lineáris tagjait vesszük figyelembe. (Más szóval: az alakváltozási energiában a negyedrendű tagok valóban el vannak hanyagolva. Azt gondolom, ez kis alakváltozások esetén szokásos.)

b) 3. megjegyzés: A (D23)-(D26) képletek az alakváltozások lineáris tagjait mutatják. Ezek a tagok az (elsőrendű, hagyományos mérnöki értelemben vett) alakváltozási energia

számításánál kerülnek felhasználásra, így nincs szükség a nemlineáris tagokra. (Másképpen: az alakváltozások kicsik, az alakváltozási energia számításában a nemlineáris alakváltozási tagok hatása elhanyagolhatóan kicsi.) A nemlineáris tagra egyedül a hosszirányú normál-alakváltozásnál van szükség, mert a terhelés csak hosszirányú, és a belső erőrendszer feltételezetten megegyezik a külső terheléssel.

c) Úgy gondolom, hogy a bírálóban (1)-el jelölt bekeretezett képlet 2. tagja pontosan megegyezik a disszertáció (5.11) képletével, amennyiben az (1) képletben bevezetjük az alkalmazott feltételrendszert.

c) 4. megjegyzés: Úgy gondolom, hogy az adott speciális feltételrendszer esetén az (5.11) képlettel megadott mennyiség értelmezhető „külső munka”-ként is, de természetesen értelmezhető az „alakváltozási energia” részeként is.

Összefoglalva tehát, úgy vélem, hogy a közölt képletek az adott célkitűzésre megfelelőek, a levezetések helyesek, és a szöveges megjegyzések is helytállóak. Ugyanakkor elfogadom, hogy az itt adott magyarázatot (véltetően rövidített formában) jó lett volna szerepeltetni a disszertáció szövegében, mert e magyarázat hiányában a szakavatott olvasó elbizonytalanodhat a közölt levezetések helyességében.

24. észrevétel

(Az észrevétel a mechanikai ismeretek alapvető fontosságát hangsúlyozza.)

Válasz

Megítélésem szerint az 5. fejezet kapcsán kétféle megközelítés ütközik. Úgy értem, a Bíráló által helyesnek tartott út az, ha először felírjuk a feladatot mechanikailag általánosan, majd bevezetjük a lehetséges egyszerűsítéseket, közelítéseket. Én ezzel szemben azt az utat alkalmaztam, hogy számos egyszerűsítést/közelítést már eleve feltételeztem, így némileg egyszerűbben (és talán szélesebb közönség számára érthetően) fogalmaztam meg a problémát. Bizonyos vagyok benne, hogy – helyesen alkalmazva – a kétféle megközelítés ugyanarra az eredményre vezet. Egyáltalán nem állítom, hogy az általam alkalmazott megközelítés „az egyedül helyes” út, de azt vélem, hogy az adott esetben volt indokoltsága és létjogosultsága.

Természetesen nem vitatom, hogy a stabilitási feladatok megoldása (is) igényli a mechanika alapos ismeretét. Nem érzem magam abban a helyzetben, hogy általános érvényű kijelentéseket fogalmazzak meg a stabilitással foglalkozó irodalmakról és kutatókról, sőt, bevallom, merésznék gondolom azt, aki erre hivatottnak érzi magát. Remélni merem, hogy magam a szükséges mértékben rendelkezem mechanikai ismeretekkel, de elfogadom, még ha sajnálattal is, ha a disszertációból ez nem derül ki meggyőző módon.

1. tézisre vonatkozó megjegyzés

... Nem tartom tézis súlyú részeredménynek az (a) alatti felsorolást, azaz mechanikai kritériumok megállapítását, mivel azok kézenfekvő és Vlaszov-féle rúdelmélet alapján is adódó természetes követelmények. ...

Válasz

Elfogadom, ha a tézis a) része nem tűnik túlságosan nagy intellektuális teljesítménynek. A cFSM kidolgozásánál ez fontos lépés volt, mert enélkül nem lehetett volna levezetni a kényszermátrixokat, és az általam megadott rendezett formában a feltételeket korábban más nem adta meg. De valóban igaz, hogy az a) tézistrésznek inkább csak a b) tézistrésszel együtt van értéke.

3. tézisre vonatkozó megjegyzés

... az a) jelű rész tézist nem tudom elfogadni mivel nem egészen értem, hogy mire gondol a Pályázó a "formulae for the modal identification" kifejezés alatt ... Mindent összevetve a harmadikat tartom a leggyengébb tézisnek a négy közül.

Válasz

A tézis a) része tulajdonképpen a hibaminimalizációs eljárásra, és annak eredményére utal, azaz a (4.1)-(4.6) képletekre, elsősorban is a (4.4)-(4.6) képletekre.

A Bíráló szerint a 3. tézis a leggyengébb a négy közül. Ami a 3. tézis mögötti intellektuális teljesítményt illeti, bevallom, egyetértek a Bírálóval. Megjegyzem ugyanakkor, hogy a módidentifikációs eljárásomat többen is alkalmazták, továbbfejlesztették, mostanság is jelennek meg ilyen témájú cikkek. Ezen továbbfejlesztések részben tőlem teljesen függetlenül, részben velem együttműködve történtek. Bár bizonyos továbbfejlesztésekben volt részem, a saját eredményeimet nehéz pontosan körülhatárolni, ezért ezen továbbfejlesztések alapján nem jelentettem ki saját téziseket vagy altéziseket.

Pontatlanságok, apró megjegyzések

1. Egyetértek.
2. Egyetértek.
3. Egyetértek.
4. A CUFSM betűszó egy végessávós programot jelöl, lásd részletesen a 23. észrevételre adott válaszban. Maga a betűszó egyébként a Cornell University és a Finite Strip Method kezdőbetűiből alakult ki, mert a program eredeti szerzője a Cornell egyetemen volt doktorandusz, amikor a program első verzióját megírta.
5. A GBTUL betűszó egy „Generalized Beam Theory” nevű eljárást alkalmazó programot jelöl. Maga a betűszó az eljárás kezdőbetűiből illetve a Technical University of Lisbon kezdőbetűiből alakult ki, mert a programot Lisszaboni Egyetemen írták. (Érdekesség: néhány évvel ezelőtt az egyetem átnevezte magát „Univeristy of Lisbon”-ra, de a GBTUL betűszó így is értelmezhető maradt.)

6. Számomra örök dilemma, hogy szabad-e, illetve érdemes-e a „Finite Strip Method” és hasonló kifejezéseket nagy kezdőbetűkkel írni. Úgy tapasztalom, elterjedtem alkalmazzák mind a kis kezdőbetűs, mind a nagy kezdőbetűs írásmódot.
7. Egyetértek. Az m egy (pozitív egész) paraméter az FSM alakfüggvényben. Fizikai jelentése tulajdonképpen a félhullámhosszak száma hosszirányban. A sormátrixok elválasztását illetően: ahol nem éreztem egyértelműnek, ott az elemeket a zárójelezéssel igyekeztem elválasztani, de természetesen a Bíráló által javasolt megoldás is jó (talán jobb is) lett volna.
8. A kétféleképpen kinéző „görög kis teta” karakter a dolgozatban ugyanazt jelenti. (Sajnos, nem sikerült elérnem, hogy a Word szövegszerkesztő képletszerkesztője egységesen írja.)
9. Egyetértek.
10. Egyetértek.
11. Egyetértek, ez egy szedési hiba.
12. Igen, a Bíráló értelmezése a helyes. Úgy véltem, a szövegkörnyezetből egyértelmű az adott szimbólumok jelentése, de nyilván helyesebb lett volna megadni a definíciókat.
13. Úgy véltem, a szövegkörnyezetből egyértelmű az adott szimbólumok jelentése, de nyilván helyesebb lett volna megadni a definíciókat.
14. Egyetértek.
15. Egyetértek.
16. Egyetértek.
17. Egyetértek.
18. Egyetértek.
19. Egyetértek.
20. Egyetértek. A közelmúltban más is felhívta erre a tipikus hibámra a figyelmemet.
21. Igen, a „BC” a „boundary condition” kifejezés rövidítése. Egyes (véltetően inkább amerikai) irodalmakban viszonylag szokásos, de helyesebb lett volna, ha a disszertáció megmagyarázza.
22. Egyetértek.
23. Igen, a Bíráló értelmezése helyes.
24. Igen, a Bíráló értelmezése helyes.
25. Egyetértek.
26. Úgy vélem, ebben az esetben a „the” névelő alkalmazása kívánatos, mert a névelő nem a „GDLO”-ra, hanem a „GDLO participation” kifejezésre vonatkozik.
27. Bevallom, ezt nem tudom megítélni, de elfogadom.