

BÍRÁLAT

Papp Ferenc:

Acélszerkezetek integrált analízise és méretezése: az újszerű eljárásoktól az alkotásig
című, az MTA doktora cím elnyerésére készült értekezéséről

Az alábbi bírálatot a Magyar Tudományos Akadémia Doktori Tanácsa DT.58.041/18/06 számú felkérésére állítottam össze.

1. A doktori mű formai és tartalmi felépítése

Az értekezés érdemi terjedelme - a tartalomjegyzék, jelölések listája, függelékek és az irodalomjegyzék nélkül - 100 oldal. Az értekezést tizenegy, összesen 17 oldal terjedelmű függelék zárja, amelyek az egyes fejezetekhez kapcsolódó részletes számításokat, a ConSteel programrendszer releváns felhasználói felületeinek képeit és néhány dokumentum másolatát tartalmazzák. A fejezetenkénti bontásban szerkesztett irodalomjegyzék (*Hivatkozások*) 147 tételből áll, ezek között van néhány ismétlődő cím.

Az első fejezetben jelölt röviden ismerteti és indokolja az értekezésben leírt kutatómunka előzményeit, módszerét és célkitűzéseit. A fő célkitűzés az acélszerkezetek stabilitási ellenállás számítására alkalmazható eljárások egy lehetséges módszerének, az egyenértékű geometriai tökéletlenség elvének (OIM, *Overall Imperfection Method*) általánosítása a globális stabilitásvesztési módokra. Ezen elv szerint a stabilitási határállapot vizsgálata elvégezhető a megfelelő geometriai tökéletlenséggel (geometriai imperfekció, alakhiba) rendelkező rúdszerkezeti elemre vonatkozó másodrendű számítás alapján is. Jelölt a geometriai imperfekció eloszlását a stabilitásvesztéshez tartozó alakkal (sajátvektor) adja meg. Ezt az EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3, (továbbiakban EC3) szabvány 5.3.2(11) pontja, mint alternatív eljárást, megengedi.

Az értekezés második fejezete rúd keresztmetszeti jellemzők számítására alkalmas módszereket ismertet. Az itt bemutatott eljárás fontos jellemzője, hogy a tényleges (nominális) és a méretezéshez/ellenőrzéshez szükséges (effektív) keresztmetszeti tényezők számítását egységes rendszerben végzi el. Az EC3 szabvány alapú keresztmetszeti tényezők számításánál a problémát az jelenti, hogy egy vékonyfalú szelvény nyomott részeinek méretét a keresztmetszeti osztálybesorolástól függően, a lehetséges lemezhorpadás gyengítő hatása miatt csökkenteni kell. Vagyis, az effektív geometriai jellemzők nagysága függ a keresztmetszet igénybevételeitől is.

A harmadik fejezet egy megvalósított rúd végeelem modellt mutat be. Az *Euler-Bernoulli*, és a *Vlasov* féle rúdelméleteket alkalmazó, csomópontonként 7 szabadságfokú rúdmodell a csavaráshoz kapcsolódó jelenségek pontosabb vizsgálatát teszi lehetővé. Jelölt a szakirodalomból átvett részleteket úgy módosította, hogy az alkalmas legyen kúpos - lineárisan változó magasságú - gerendák vizsgálatára is.

A negyedik - nyolc oldalból álló - fejezet az EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3 szabvány 6. fejezetéhez kapcsolódik, és a tisztán nyomott, hajlított, valamint az egyidejűleg nyomott és hajlított rúdelemek "általános" stabilitási méretezésére alkalmas formulák elemzésével, továbbfejlesztésével foglalkozik.

Az ötödik fejezet a vékonyfalú acélszerkezeti rúdelemek stabilitási méretezésének egy speciális módszerével, az egyenértékű geometriai tökéletlenség vagy imperfekció (*Overall Imperfection Method OIM*) elvének továbbfejlesztésével foglalkozik. Az elv szerint minden elemhez hozzárendelhető egy kezdeti geometriai alakhiba vagy görbeség. Ezen alakhibás

elemekre elvégzett másodrendű elmélet szerinti statikai vizsgálat helyettesíti a stabilitásvizsgálatot. Az EC3 szabvány tisztán nyomott elemekre most is megengedi az elv alkalmazását. A kezdeti alakhiba eloszlását a rugalmas stabilitásvesztési alak (sajátvektor) jellemzi. Jelölt ebben a fejezetben bemutatja az *OIM* eljárás kiterjesztését összetett - nyomott és erős tengely körül hajlított és változó keresztmetszetű (kúpos) szerkezeti elemek stabilitási problémájának vizsgálatára. Jelölt saját módszerének pontosságát publikált numerikus kísérletek eredményeivel ellenőrizte.

A hatodik fejezet azokat az alkotásokat ismerteti, melyekben az előzőekben részletezett kutatási eredményeket alkalmazta. Ezek a *ConSteel* integrált acélszerkezet számoló-tervező szoftver *Section*, *Analysis* és *Design* moduljai, továbbá egy konkrét tervezési feladat, az új UTE stadion acélszerkezetének koncepcionális tervezése. Ebben a fejezetben röviden értékeli a tervezési módszerek fejlődését és rámutat a tervezés komplex folyamatának egy ma is létező belső ellentmondására. Egyrészt, széles körben elterjedtek a komplex, térbeli (3D) modelleken végzett, nagy pontosságú mechanikai számításokra alkalmas, elsősorban végeelem alapú szoftverek. Másrészt, a kiértékelés (vagy tervezés) fázisát még mindig a szabványos formulák alkalmazása dominálja. Ez az ellentmondás ebben a dolgozatban is tetten érhető.

Jelölt az öt tézisét az azokat kifejtő és megalapozó fejezetek végén közöli.

A mellékelt, 25 oldalas magyar nyelvű tézisfüzet az értekezésben részletesen kifejtett új tudományos eredmények rövid összefoglalóját tartalmazza. A tézisfüzet felsorolja jelöltnek a tézisek témájában megjelent valamennyi publikációját, valamint a csatlakozó szakirodalom legfontosabb közleményeit is.

Az értekezés közel két évtizedes kutató-fejlesztő munka jelentősebb eredményeit foglalja össze, amit a jelen doktori mű mellett a publikációk nagy száma és a *ConSteel* programrendszer egyes moduljai is reprezentálnak. Jelölt munkássága és eredményei az építőmérnöki méretezéselmélet témakörébe tartozik.

A dolgozat szép kivitelű, a szöveg jól érthető.

Végezetül megállapítottam, hogy az értekezés megfelel az MTA Műszaki Tudományok Osztálya által elvárt formai követelményeknek.

2. Az értekezés tartalmi elemei és bírálatuk

A továbbiakban az értekezés olvasási rendjét követve, a kapcsolódó szövegrészek előfordulási sorrendjében írtam le észrevételeimet, megjegyzéseimet és kérdéseimet. A felsorolásban aláhúztam azokat az érdemi kérdéseket, amelyekre adandó válaszok a tézisek végső megítélése szempontjából fontosak.

1. fejezet

- 1.1. 4. oldal: Az oldal felső részén szerepel először a "*GMNIA alapú* .." kifejezés. Mi a *GMNIA* betűszó értelme?

2. fejezet

- 2.1. 14. oldal: Az 1D (*EPS*) modell mellett miért van szükség a 2D (*GSS*) modellre is? A 2.1 példa tanulsága, hogy a két modellből származó eredmények lényegében azonosak. Ha jól értem, a továbbiakban a származtatott modellek csak az 1D modellre épülnek.
- 2.2. 15. oldal: A 2.2 táblázat 8. sorában a CHS mire utal?

- 2.3. 15. oldal: Nem találtam a leírását annak, hogy az UPR modell milyen képlékeny jellemzőket határoz meg. A 2.1. példa eredményei között csak a $W_{pl,y}$ és a $W_{pl,z}$ szerepel. Ha a hajlítás tengelye nem szimmetriatengely, más jellemzőkre is szükség lehet.
- 2.4. 16. oldal: A 2.2 fejezetben nagyon rövid az effEPS modell leírása. A nem hatékony lemezrészecskék méretének meghatározása a szöveg szerint az EN 1993-1-3 alapján történik. Ez vajon egyértelműen meghatározza a követendő eljárást? Úgy tudom, hogy az idézett szabvány alternatív számítási eljárásokat ad meg, például a 4.3 és az Annex E fejezetekben. Szükség van a számítások során iterációs lépésekre is?
- 2.5. 17. oldal: A 2.1. példa nominális keresztmetszeti jellemzői között megjelennek a W^1_{elY} , W^1_{elZ} és a W^2_{elY} , W^2_{elZ} eredmények. A felső index mit jelent?
- 2.6. 18. oldal: Az ábra alatti első sorban lévő "EC3-1-5 4.3.(5)" hivatkozás valószínű, hogy az EN 1993-1-5 (2006) Eurocode 3 4.3 fejezetének (5) pontjára utal. Biztos, hogy helyes ez a hivatkozott hely?
- 2.7. 22. oldal: Kár, hogy a 2.2. példa jellemzői között nem jelenik meg a $W_{pl,y}$ számértéke, amivel ellenőrizni lehetne a 23. oldal táblázatának eredményeit. (Saját számításom szerint a fél keresztmetszet S_y statikai nyomatékának kétszerese 628358 mm^3 .)

3. fejezet

- 3.1. 24. oldal: Az első bekezdésben az elcsavarodás deriváltjára használt *elcsavarodás sebessége* elnevezés nem túl szerencsés. Például a lehajlás deriváltját, a rúd keresztmetszet szögelfordulását sem nevezzük lehajlás sebességnek. Szerintem, a (3.3) formula utolsó tagjából kiindulva, jobb lenne a *vetemedési paraméter* elnevezés.
- 3.2. 27. oldal: A (3.1) virtuális munka elv jobb oldala szerint a rúdelemre csak a két végén működik külső erőhatás. Hogyan veszi figyelembe a 3.2 példában (33. oldal) a Z irányú vonalterhelést, vagy más esetben a térfogaton megoszló önsúly terhelést?
- 3.3. 28. oldal: A táblázat után szerepel egy félreérthető kijelentés, " *Vlasov ... elméletét követve a keresztmetszet torzióját elhanyagoljuk.*" Ha van csavaró igénybevétel és elcsavarodás, azaz torzió, akkor az idézett *torzió* szó mire utal?
- 3.4. 29. oldal: Furcsa, de persze nem hiba, hogy Jelölt a (3.5) vektorban a szögelfordulásokat x, z, y sorrendben írja le, a természetesebbnek tűnő x, y, z sorrend helyett.
- 3.5. 29. oldal: A (3.3) axiális elmozdulás értelmezésénél fontos lenne megadni, hogy itt mi az ω jelentése. Ez a görög betű a jelölésjegyzékben sem szerepel. A szakirodalomban szinte kizárólag így jelölik a vékonyfalú szelvények D csavaróközéppontjához tartozó szektor terület függvényét, és ebből kell számolni többek között az I_ω öblösödési tényezőt is.
- 3.6. 34. oldal: A lineárisan változó gerincmagasságú gerendák kezelése és a (3.10) formula kapcsán a következő két kérdésre várom a választ:
 - A (3.10)-ben és az F3 függelékben definiált K_T mátrix saját vagy valahonnan átvett eredmény? Ha saját eredmény, a részletesebb leírást, ha átvett, a hivatkozást hiányolom.
 - A K_S lineáris és a K_G geometriai merevség mátrixok egyaránt térfogati - hossz és keresztmetszet menti - integrálok eredményei. Mi a magyarázata, hogy a változó keresztmetszet hatása nem jelenik meg a K_G geometriai merevség mátrixban?
- 3.7. 36. oldal: A 3.3. példában a gerenda elem egyik terhelése a felső övre ható F_z keresztirányú erő. Hogyan veszi figyelembe bemutatott modell a külső terhelések excentricitását?

3.8. F.2. Függelék:

- A c és f mátrixelemek hibásak, ez nyilván elírás, az l elemhossz nincs jó helyen.
- A több helyen is megjelenő P feltehetően a C (vagy más) támadáspontú axiális terhelő erő. Ez így nincs benne a jelölésjegyzékben, a 3.1 táblázatban és a 3.5 ábrán pedig f_x és f_l szerepel.
- A lap alján a $\bar{K}$ definíciójában lévő a értelmezése hiányzik. Ez nyilván nem azonos az ezen az oldalon lévő a mátrixelemmel. Ha jól értem a szöveggörnyezetet, akkor ez a $\bar{K}$ az úgynevezett Wagner féle nyomaték, amiben olyan új keresztmetszeti tényezők jelennek meg, amelyeket a *SECTION* modullal lehet (lehetne) meghatározni.

4. fejezet

Ez a rész lényegében az *EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3* szabvány 6. fejezetéhez kapcsolódik, és a tisztán nyomott, hajlított, valamint a nyomott és hajlított rúdelemek stabilitási méretezésére alkalmas formulák elemzésével, továbbfejlesztésével foglalkozik. Mivel ez egy kifejezetten építőmérnöki alkalmazásra érvényes szabvány, annak tartalmát és a benne leírt formulák, módszerek gyakorlati alkalmazásának lehetőségeit nem ismerem olyan szinten, hogy a dolgozat 4. fejezetéről és a kapcsolódó 3. tézisről szakmailag megalapozott véleményt tudjak mondani.

5. fejezet

- 5.1. 46. oldal: Az oldal alján szerepel a következő mondat: "A kezdeti geometriai tökéletlenséget helyettesítő kezdeti teherrel veszem figyelembe." Az eddig leírtak alapján nem egyértelmű, hogyan veszi figyelembe a kezdeti alakhibát? A csomóponti koordinátákat módosítja, azaz egy kissé görbült rúdra végez másodrendű számítást, vagy kreál egy fiktív oldalirányú megoszló terhelést (lásd idézett szabvány 5.3.2(7) ajánlása) és ezzel kiegészítve a tényleges terhelést, az egyenes rúdelemen végez másodrendű statikai vizsgálatot.
- 5.2. 47. oldal: Ha igaz, hogy az 5.1. ábra szerinti $v(x)$ (zöld) lehajlást a tökéletes (kék) alaktól mérjük, akkor az (5.2) eredmény helyesen $v_{init}(x)\alpha_{cr}/(\alpha_{cr} - 1)$. A (5.2) leírt alakja csak akkor helyes, ha a $v(x)$ (zöld) lehajlást a tökéletlen (fekete) alaktól mérjük.
- 5.3. 48. oldal: Itt mit jelent az "affin" leképezés? Az (5.6) összefüggésből, tekintettel (5.1) és (5.2)-re, $v_{init,max} = v_{cr,max}$ következik.
- 5.4. 49. oldal: Ha jól értem az indoklást az oldal tetején, az (5.10) előnye, szemben az (5.5) kifejezéssel az, hogy nincs szükség az EC3 6.3.12 fejezet szerinti α "imperfection factor" meghatározására.
- 5.5. 50. oldal: Az (5.12) egy közismert aránypár, de ismereteim szerint az csak a sajátvektorok $v_{cr,max}$ és $\varphi_{cr,max}$ maximumaira érvényes. Hogyan következik ebből az itt felírt (5.12) összefüggés?
- 5.6. 57. oldal: Az 1. munkahipotézis nem csak I szelvényre vonatkozik? Erre utal még az is, hogy az 59 oldalon idézett adatbázisban, ha jól látom, csak I szelvényekre vonatkozó eredmények vannak.
- 5.7. 58. oldal: Az 5.4. (és később, az 5.11.) ábrán a gyártási maradó feszültség eloszlás β paraméterének mi a szerepe a bemutatott számításokban?
- 5.8. 68. oldal: Milyen a lap alján említett SHS szelvény?

- 5.9. 75. oldal: Milyen tapasztalatok vezettek a 3. munkahipotézis megfogalmazásához? Ez a szöveg azt sejteti, hogy a vékony szelvényeknél a gátolt csavarásnak a stabilitási feladatokban sokkal nagyobb jelentősége van, mint a statikai, szilárdsági számításoknál. Saját tapasztalatom szerint hasonló a helyzet dinamikai számítások esetén is. A sajátfrekvenciák értékét és a lengésképeket a gátolt csavarás figyelembevétele, vagy éppen az elhanyagolása számottevően befolyásolja.
- 5.10. 77. oldal: Véleményem szerint az 5.4.3 fejezetet inkább tekinthetjük probléma felvetésnek, vagy egy fontos új kutatási irány kijelölésének, mint gyakorlati alkalmazásra kész eredménynek.

3. Állásfoglalás a tézisekről

1. Az első tézist nem fogadom el MTA doktori tézisként. Keresztszetszeti jellemzők számításának különböző algoritmusai jól ismertek. Ugyancsak ismertek az effektív keresztszetszeti jellemzők számítására alkalmazott EC3 szabványos összefüggések. Vagyis itt alapvetően adaptációról van szó. Hozzá kell tennem ugyanakkor, hogy Jelölt által létrehozott számoló modul - ami egyébként joggal szerepel a 6. fejelet kiemelkedő alkotásai között is - a szerkezettervezés igen fontos és hasznos eszköze.
2. A második tézis elfogadásáról a 3. fejezet kapcsán megfogalmazott kérdésekre adandó válaszok ismeretében tudok nyilatkozni.
3. A harmadik téziszről a 4. fejezethez kapcsolódó megjegyzésemmel összhangban nem nyilatkozom.
4. A negyedik tézist elfogadom.
5. A hatodik fejezetben bemutatott kiemelkedő műszaki alkotások valóban elismerésre méltók.

4. Állásfoglalás a nyilvános vita kitűzéséről

A doktori dolgozat, valamint pályázó saját publikációi alapján megállapítható, hogy Jelölt az építőmérnöki méretezéselmélet témakörében időszerű, fontos témát dolgozott fel és új tudományos eredményeket mutatott be.

Javaslom a nyilvános vita kitűzését.

Budapest, 2019. február 7.

Dr. Vörös Gábor
az MTA doktora, egyetemi tanár