



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Hidak és Szerkezetek Tanszéke

Melegen hengerelt acélrudak szabványos teherbírásának vizsgálata valószínűségelméleti alapokon

PhD értekezés tézisei

Szalai József
okleveles építőmérnök

Tudományos vezető:
Dr. Papp Ferenc
egyetemi docens, a műszaki tudomány kandidátusa

Budapest, 2007.

1. BEVEZETÉS

Szerkezetek valószínűségelméleti alapokon történő vizsgálatának fő célja mindig a gyakorlati tervezés kockázatának minimalizálása a gazdaságosság figyelembevételével. A gyakorlati tervezés legfőbb eszközei és támaszai a szabványok, ezek méretezési eljárásait alkalmazva gondoskodhat a tervező szerkezetének kellő biztonságáról. Ez természetesen egy hatalmas felelősséget hárít át a szabványra – és azok alkotóira –, amely a gyakorlati alkalmazhatóság miatt igen egyszerű formulákon keresztül próbálja lefedni a tervezés minden mozzanatát egyensúlyozva a biztonság és a gazdaságosság ellentétes követelményei között. Éppen ezért igen szükséges a szabványok felülvizsgálata, fejlesztése időről időre, alkalmazva a legkorszerűbb kutatási eredményeket és módszereket – kísérleti és numerikus ágban egyaránt –, figyelembe véve az egyre szélesedő statisztikai adatokat. Ezek a feladatok jelenleg különösen aktuálisak, hiszen a mostani időszak szolgál az egységes európai szerkezeti szabványrendszerek, az Eurocode-ok (EC) fejlesztésére, megismerésére, és bevezetésére.

A szabványos eljárások finomításának, kalibrálásának több szintje lehetséges: a legalapvetőbb feladat egy egyszerű alakú, de mégis kielégítő pontosságú megoldást szolgáltató fizikai modell keresése (pl. a kihajlási görbe). Ez a modell meghatározott determinisztikus problémák esetén alkalmazható, működése kísérletek vagy fejlett numerikus számítások eredményei alapján kalibrálható. A modellel számított eredmények megfelelő biztonsága a különböző bemeneti paraméterek (pl. folyáshatár) értékének alkalmas felvételével – karakterisztikus értékek – és további biztonsági tényezők segítségével érhető el. Ezek kalibrálása nagyszámú mérés és modellkísérlet, vagy nagy pontosságú sztochasztikus numerikus számítások eredményének alkalmas valószínűségelméleti módszeren alapuló statisztikai kiértékelésével biztosítható. Amennyiben a kalibráció elméleti úton történik – ez a szélesebb körben alkalmazható és olcsóbb mód – úgy az eredmények értékét, gyakorlati használhatóságát befolyásoló három, egymással szoros összefüggésben levő összetevő: a determinisztikus modell, a figyelembe vett véletlen változók halmaza és a kettőt összekapcsoló valószínűségelméleti eljárás. A determinisztikus modell határozza meg a számítások fizikai tartalmának mélységét, ezzel összhangban érdemes megállapítani a véletlen változók részletezettségét, természetesen figyelembe véve a rendelkezésre álló statisztikai adatok megbízhatóságát, amely egyben a valószínűségelméleti eljárás szükséges és elégséges pontosságát is megszabja. E három komponens konzisztens, egységes pontosságot adó kezelése jelentheti a szabványos eljárások legmagasabb szinten történő elméleti kalibrációjának alapját.

2. A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI

Az 1960-as évektől kezdve az ECCS (European Convention for Constructional Steelwork) által összefogott nagyszabású kísérletsorozat kezdődött acél rúdszerkezetek megfelelő stabilitási méretezésének kifejlesztése és egységesítése érdekében. A számos kutatóintézet által végzett kihajlási, és kifordulási kísérletek teremtették meg az alapot az Európai stabilitási görbék (European buckling curves) 1970-es években történő fizikai és valószínűségelméleti kalibrációjához, amelyek a mai napig az acél rúdszerkezetek stabilitási méretezésének alapmodelljéül szolgálnak. A kísérleti eredményeket és azok valószínűségelméleti kiértékelését természetesen elméleti és numerikus úton is megpróbálták igazolni. Számos kutatás szólt a kihajlási és kifordulási görbék numerikus kalibrációjáról, amelyet az akkori módszereknek és számítástechnikai lehetőségeknek megfelelő, mai mértékkel elég alacsonynak mondható pontossági szinten végeztek. A stabilitási görbék újabban megjelentek a horpadási és torzulással járó kifordulási méretezés formulái között is, valamint alapjait szolgáltatják a legújabb szabványos eljárásnak tekinthető általános stabilitásvesztési méretezési módszernek is. Annál is inkább érdekes, hogy azóta a megsokszorozódott mérési eredmények és numerikus számítási lehetőségek ellenére nemigen történt lépés a stabilitási görbék és az azon alapuló egyre nagyobb számú méretezési eljárások megfelelően mély tartalmú elméleti kutatására valószínűségelméleti alapokon.

A kutatás további előzményei között kell megemlíteni a három komponens elmúlt bő két évtizedben történt igen nagymértékű fejlődését. Szerkezetek determinisztikus modellezésére a legáltalánosabb módszerek a végesesemes eljárások. Az évek során számos, egyre kifinomultabb módszert fejlesztettek ki, melyek a kiindulási paraméterek igen széles halmazát képesek számításba venni. Ugyanakkor természetesen minél pontosabb módszert alkalmazunk, annál igényesebben kell minden számítást előkészíteni, és annál nagyobb számítási kapacitás és idő szükséges a megoldáshoz, valamint a numerikus bizonytalanságok is igen megnőnek. Mindezek a problémák még hatványozottabb módon jelentkeznek valószínűségelméleti vizsgálatok esetén, hiszen ekkor a megfelelően pontos eredmények érdekében igen sok determinisztikus számítást kell elvégezni a kiindulási paraméterek jelentős változása mellett. Melegen hengerelt acélszelvények stabilitásvizsgálata esetében kielégítő pontosságot ad a 14 szabadságfokú vékonyfalú rúdelem, melyhez rugalmas-képlékeny anyagmodell is definiálható. Ez a modell a kiindulási paraméterek megfelelően széles halmazát képes figyelembe venni, ugyanakkor elfogadható számítási időt produkál. A véletlen változóként definiált paraméterek felvételére is számos mérési eredmények statisztikáin alapuló ajánlás született. A gyártási technológiák fejlődése azonban megköveteli ezek időről-időre történő felülvizsgálatát és adott esetben javított értékekkel való számításba vételét. Szerkezetek valószínűségelméleti számítási módszereire is nagyszámban születtek javaslatok, melyek különböző – gyakran igen erős – követelményeket tartalmaznak a determinisztikus modellre nézve, igen leszűkítve az alkalmazható eljárások körét. A kifinomult módszerek alkalmazásának pedig a rendelkezésre álló, általában a valószínűségelméleti modell pontossági szintjéhez képest igen szegényes statisztikai adatsor szab határt. Mindezek alapján látható, hogy konzisztens eredmények eléréséhez már a három komponens összhangba

hozása sem egyértelmű feladat, és bár külön-külön számos kutatás tárgyát képezi, a gyakorlati alkalmazáshoz szükséges egységes kezelésre nemigen akad példa.

3. A KUTATÁS CÉLJA

Az eddig leírtakat figyelembe véve az acél rúdszerkezetek stabilitásának valószínűségelméleti alapokon történő vizsgálatának célja kettős volt:

- megtalálni a melegen hengerelt rúdszerkezetek valószínűségelméleti vizsgálatához szükséges említett három komponens megfelelően pontos és koherens modelljét, amely alkalmas a szabványos eljárások kellően mély vizsgálatára; ez tehát a determinisztikus modell fejlesztését, statisztikai adatsorok és valószínűségelméleti módszerek kutatását jelentette;
- a meghatározott három összetevő használatával valószínűségelméleti számítások végzése, melyeknek egyrészt az a célja, hogy az eddigi kutatásokhoz képest mélyebben bemutassa a vizsgált szerkezetek valószínűségi viselkedését, így az egyes véletlen paraméterek hatását, magasabb rendű összefüggések befolyását (korreláció, változók egymásra hatása, magasabb rendű statisztikák alkalmazása); másrészt a számítások eredményei alapján az eddigiéknél pontosabb módon megvizsgálható a szabványos kihajlási és kifordulási méretezési eljárások biztonsági koncepciója, egységessége.

4. A KUTATÁS RÖVID BEMUTATÁSA

A disszertáció acélszerkezetek tönkremenetelének részletes valószínűségelméleti vizsgálatához nyújt módszert és tartalmaz alkalmazási eredményeket. Acélszerkezeteken belül a tanulmány olyan melegen hengerelt I keresztmetszetű rúdszerkezetekkel foglalkozik, amelyek várható tönkremenetelét az alkotó elemek lokális horpadása nem befolyásolja (az EuroCode 3 szabvány szerinti 1. és 2. osztályú szelvények). A dolgozat a kutatás három jól elkülöníthető részéhez kapcsolódó három fő vonalból áll: az első az alkalmazott determinisztikus eljárást ismerteti, a második a valószínűségelméleti számításokkal foglalkozik, részletesen bemutatva a vizsgált véletlen paramétereket, illetve azok (leginkább irodalmi eredmények alapján meghatározott) statisztikai adatait, míg a harmadik a szabványos eljárások vizsgálatával foglalkozik.

Az első részben az acél rúdszerkezetek determinisztikus vizsgálatának általam alkalmazott és fejlesztett módszerét mutatom be. A disszertáció témájának szempontjából fontos rugalmas-képlékeny stabilitásvesztés fizikai tartalmának kellő mélységű modellezéséhez egy 15 szabadságfokú rúd-végeselemet alkalmaztam. A végeselem alkalmas a rúd teljes geometriai másodrendűségének leírására a vékonyfalú szelvényeknél jelentős öblösödés hatásának figyelembevételével. A végeselem

modellhez valódi rugalmas-képlékeny anyagmodellt definiáltam, amely számításba veszi az anyagtulajdonságok rugalmas visszaterhelés hatására beálló változását. Az anyagtulajdonságok térbeli terjedésének helyes követése egy speciális keresztmetszeti modell alkalmazását követelte meg, amely kihasználja a vizsgált szelvények lemezelemeinek nagy karcsúságát (vékonyfalú keresztmetszet közelítései), ugyanakkor a képlékeny részek terjedésének a lemezvastagság mentén való követését is lehetővé teszi. A melegen hengerelt szelvényeknél jelentős gyártási sajátfeszültségek modellezésére új módszert dolgoztam ki. Ennek során a csavarásból származó feszültségeket is figyelembe vettem a sajátfeszültségek eloszlására felírt követelmények közt. Ezáltal egy olyan feszültségeloszlást kaptam, amely reálisabb módon modellezi a rugalmas-képlékeny kifordulási problémát. A rugalmas-képlékeny stabilitási feladatok hatékony megoldására egy új, kifejezetten rúdelemek számításához igazodó növekményi-iterációs megoldási eljárást fejlesztettem. A megoldási módszer különösen alkalmas változó kezdeti paraméterekkel ellátott problémák automatikus kezelésére. Ez a tulajdonság igen fontos a valószínűségi számítások esetén, hiszen ekkor a feladat paraméterei véletlen változók. Végül a bemutatott determinisztikus végelelemes eljárás megoldásait általam végzett kísérletek eredményeivel vettem össze, mely során igazoltam a modell helyes működését.

A második részben az acél rúdszerkezetek stabilitási teherbírásának magas szintű valószínűségelméleti alapokon történő vizsgálatát mutatom be. Egy részletes irodalmi áttekintés után rögzítettem a vizsgálandó kérdések körét, és kijelöltem a kutatás fő célját: egy jelenleg elérhető statisztikai adathalmazra épülő, mély fizikai tartalmat képviselő determinisztikus eljárást alkalmazó kutatás végrehajtása, melynek eredménye egyrészt korszerű és részletes képet ad az acél rúdszerkezetek sztochasztikus viselkedéséről, másrészt alkalmas a szabványos teherbírási formulák megbízhatósági ellentmondásainak feltárására. A kitűzött cél figyelembevételével kiválasztottam az alkalmas valószínűségelméleti módszert. Kijelöltem az eredmények pontosságához elengedhetetlenül szükséges véletlen változók halmazát, és részletes irodalomkutatás valamint saját mérések alapján meghatároztam ezek minden értékelhető valószínűségi paraméterét. Bemutattam az elvégzett számítások alaperedményeit: a teherbírások egyes véletlen változókra való érzékenységet, ez alapján az egyes változók jelentőségét és a teherbírások relatív szórásának változását a rúdcarcsúság függvényében. Ezután az alaperedmények felhasználásával magasabbrendű valószínűségi számításokat végeztem. Kimutattam, hogy a rendelkezésre álló, véletlen változók közötti statisztikai korreláció figyelembevétele jelentős mértékben csökkenti a teherbírás szórását. Bemutattam, hogy az egyes változók együttes hatásának figyelembevétele elhanyagolható mértékben van hatással a teherbírásra, így a valószínűségelméleti számításokból kihagyható. Egy új, az eddigieknél reálisabb módszert dolgoztam ki a rúd kezdeti görbeségének és a keresztmetszet gerince külpontosságának együttes figyelembevételére. Bemutattam a szabványos megbízhatósági analízisekben jelentős kvantilisek harmadik valószínűségi momentumot (az eloszlás ferdeségét) is számításba vevő meghatározását.

Az utolsó részben mindezekkel az eredményekkel igazoltam az EC3 szabvány stabilitásvesztés elleni méretezésének alapját képező európai stabilitási görbékben rejlő ellentmondásokat, amelyek jól kimutatható ingadozást okoznak a tönkremeneteli kockázatban, azaz a tervezés megbízhatóságában. Ebből kiindulva elméleti alapokon nyugvó megoldási javaslatokat fogalmaztam meg a kihajlási görbék

megbízhatóságának egységesítése érdekében. A kifordulás esetén bemutattam az általánosított imperfekciós tényező helyes formáját, majd itt is módosító javaslatokat adtam. A javasolt módosításokkal ellátott stabilitási görbék látványosan csökkentették az ingadozást a megbízhatósági szintben.

5. AZ EREDMÉNYEK ALKALMAZÁSA, A KUTATÁS FOLYTATÁSA

Az eredmények legfőbb végső alkalmazási területe természetesen a szabványos méretezés. A gyakorlati tervezés során leginkább használt szabványos módszer egyszerű formulái biztonságának és gazdaságosságának biztosítása időről időre fontos feladat. Az elvégzett kutatás a stabilitási alapfeladatokra koncentrált, és numerikus számításokon alapuló módszert adott, valamint eredményeket szolgáltatott. Egyenes folytatásként érdemes lenne a stabilitási esetek interakciójának valószínűségelméleti alapokon történő vizsgálatát elvégezni. Ez azért is igen aktuális, mivel több új, kifinomult szabványos módszer is megjelent determinisztikus számítások eredményeként, valószínűségelméleti kalibrációra azonban nincsen példa. A statisztikai adatsorok előre szisztematikusan megtervezett bővítése, a mérések szabványosítása is igen szükséges feladat lenne, hiszen számos esetben kevés a megbízható adatsor. A legnehezebb és legköltségesebb mindazonáltal leghasznosabb kutatási feladat valószínűségelméleti kiértékelésre alkalmas kísérletsorozatok végzése, legalábbis parametrikus vizsgálatok a numerikus módszerek megfelelő kalibrálására. Mint már említettem igencsak hiányoznak a szakirodalomból a három komponens konzisztensen alkalmazó eredmények, ezek szabványt támogató bővítése szintén aktuális kutatási feladat.

6. AZ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

1. Tézis [1]

Melegen hengerelt I szelvények gyártási sajátfeszültségeire új eloszlást vezettem le. A levezetés során figyelembe vettem a sajátfeszültségek egyensúlyára felírt egyenletekben az eddig elhanyagolt csavarás hatását. A kapott parabolikus eloszlás ennek következtében nem okoz numerikus zavarokat kifordulási problémáknál a stabilitásvesztés közelében, továbbá hatása a kis és nagy karcsúságokhoz közelítve – az elméleti megfontolásoknak megfelelően – egyre csökken, így alkalmasabb a sajátfeszültség hatásának numerikus modellben való vizsgálatára.

2. Tézis [2, 6 7]

Acél rúdszerkezetek rugalmas-képlékeny teherbírásának vizsgálatához új növekményi-iterációs módszert adtam. Az eljárás különösen alkalmas változó kezdeti paraméterekkel rendelkező feladatok automatikus, mégis hatékony megoldásvezérlésére. A módszer három fázisát a rúdelem aktuális alakváltozási állapotának vizsgálatára építettem:

- a. A növekményi módszer az egyensúlyi út különböző részeit az alakváltozások terében közelítve állapítja meg az aktuális tehernövekményt. Nagy előnye a legelső tehernövekmény automatikus meghatározása.
- b. Az iteráció esetén több létező módszer alakváltozás alapú verzióját javasoltam. Iterációnál az alakváltozások vizsgálata megszünteti a különböző dimenziók keveredéséből származó problémákat (skálázási problémák).
- c. A konvergencia vizsgálatát szintén alakváltozás alapra helyeztem, így itt is megszűntek a skálázási problémák.

3. Tézis [4, 5, 8, 9]

Bemutattam az acél rúdszerkezetek kihajlásának és kifordulásának valószínűségi alapokon nyugvó koherens vizsgálatát; a véletlen változók és azok statisztikai adatsora, a determinisztikus modell, és a valószínűségi modell egységes pontosságot adó kezelésével. Vizsgálataim első részeként egy igen széleskörű, valószínűségelméleti alapokon nyugvó érzékenységi analízist hajtottam végre, megállapítottam az egyes véletlen változók különböző terhelési és rúdkarcsúságú esetekhez tartozó jelentőségét, valamint a kihajlási és kifordulási teherbírás szórásának alakulását a rúdkarcsúság függvényében.

4. Tézis [5, 9]

A kialakított valószínűségelméleti modell segítségével magasabb rendű összefüggések pontos, létező méréseken alapuló vizsgálatát végeztem el:

- a. Kimutattam a véletlen változók közötti korreláció hatását a teherbírás szórására. Megállapítottam, hogy a mérések alapján felvett övszélesség és övvastagság között fennálló negatív korreláció jelentős mértékben csökkenti a teherbírás szórását főként nagyobb karcsúságok esetén.
- b. Bemutattam a véletlen változók együttes hatásának vizsgálati módszerét, és megállapítottam, hogy ez a hatás minden esetben elhanyagolható mértékű, eltekintve a kezdeti görbeség és gerinckülpontosság (vagy teher külpontossága)

együttes hatásától. Utóbbi problémára új modellezési módszert javasoltam, melynek alkalmazásával kimutattam, hogy a kezdeti görbeség és gerinckülpontosság csak együtt vizsgálható, és igen nagy mértékben befolyásolja a teherbírás valószínűségi paramétereit.

- c. Megmutattam a folyáshatár és az övvastagság statisztikai adatsoraiból kimutatható lényeges eloszlásbeli ferdeség hatását a teherbírás kvantiliseire. Megállapítottam, hogy a vizsgált pozitív ferdeség minden esetben az alsó kvantilisek emelkedését eredményezi, ennek mértéke kisebb karcsúságok esetén jelentősebb.

5. Tézis [5]

Bemutattam a kihajlási görbék alapját képező Ayrton-Perry formula, a szabványos valószínűségi kalibrációs folyamat, valamint a stabilitási görbékkel történő méretezés hiányosságait, amelyek a megbízhatósági szint ingadozását okozzák. Ezt az ingadozást numerikus eredményeimmel is igazoltam. Elméleti megfontolásokon nyugvó korrekciót javasoltam a kihajlási görbékre, amelyek numerikus eredményeim szerint valóban egységesebb megbízhatóságot eredményeztek.

6. Tézis [5, 9]

Kifordulás esetére is levezettem az általános Ayrton-Perry formulát, ezzel megmutatva az általánosított imperfekciós tényező helyes felírását is. Itt is bemutattam a megbízhatósági szint ingadozását, és annak okait, melyeket numerikus eredményeimmel is igazoltam. Az általános elméleti megfontolásokon túl az imperfekciós tényező levezetett alakjának felhasználásával módosításokat javasoltam a kifordulási görbékben, ezekkel egységesebb megbízhatóságot kaptam.

7. A KUTATÁS TÉMÁJÁBAN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

Külföldön megjelent idegen nyelvű folyóiratcikk

1. Szalai J, Papp F. A new residual stress distribution for hot-rolled I-shaped section. *Journal of Constructional Steel Research* 2005. **61/6**: 845-861.
2. Szalai J, Papp F. An automatic strain-based incremental-iterative technique for elasto-plastic beam-columns. *Structural Mechanics* 2005. **38**(1): 28-44.

Magyar nyelvű folyóiratcikk

3. Szalai J. Acélszerkezetek fejlett analízise és tervezése. *MAGÉSZ Hírlevél* 2000. II. évfolyam. 4. szám: 14-18.
4. Szalai J. Acélszerkezetek sztochasztikus viselkedése. *MAGÉSZ Hírlevél* 2003. V. évfolyam. 3. szám: 29-32.
5. Szalai J, Papp F. Szabványos stabilitási görbék felülvizsgálata. *Acélszerkezetek* 2004. I. évfolyam. 4. szám: 31-39.

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű előadás

6. Szalai J, Papp F. Simulation of beam-column stability with automatic strain incrementation. In: *Topping BHV, Bittnar Z, editors. Proceedings of the third international conference on engineering computational technology*. United Kingdom: Civil-Comp Press, pp. 29-30 (full paper on CD). Stirling, Scotland. 2002.
7. Szalai J. Steel beam-column stability simulation using automatic strain incrementation. *Stability and ductility of steel structures*. Edited by Miklós Iványi. Akadémiai Kiadó, pp. 111-118. Budapest. 2002.
8. Szalai J. Overall sensitivity analysis of hot-rolled beam-columns. *Metal structures: design, fabrication, economy*. Edited by Károly Jármay and József Farkas. Millpress, pp. 177-182. Rotterdam. 2003.
9. Szalai J, Papp F. Parameter based safety calibration approach of the resistance model in the Eurocode 3. *International Colloquium on the Stability and Ductility of Steel Structures*. Edited by Camotim D et al. Lisbon, Portugal, 2006.