

EMELŐFÜLEK VÉGESELEMES ANALÍZISÉNEK NÉHÁNY KÉRDÉSE

A STUDY ON THE FINITE ELEMENT MODELLING OF LIFTING LUGS

Dr. Gönczi Dávid*

ABSTRACT

The study focuses on the numerical investigation of structural components (primarily with cylindrical contact surfaces) used in the lifting of various structural elements. The model is developed using the finite element software Abaqus CAE. Several fundamental issues related to the modeling of lifting lugs are discussed. The paper demonstrates how boundary value problems with highly nonlinear boundary conditions can be implemented in Abaqus and highlights features and common difficulties encountered in the numerical analysis of contact problems involving cylindrical surfaces.

1. BEVEZETÉS

A mérnöki gyakorlatban sok helyen találkozhatunk emelőfülekkel (vagy emelőszemekkel, angolul *lifting lugs* vagy *lifting eyes*). Ezek olyan szerkezeti elemek, amelyeket nehéz berendezések, tartályok, gépházak, acélszerkezetek vagy egyéb komponensek biztonságos emelésére, mozgatására és rögzítésére terveznek. Alapvető szerepük, hogy az emelés során fellépő erőket és nyomatókakat biztonságosan átadják a fő szerkezetre, miközben megakadályozzák a lokális anyagkárosodást vagy instabilitást. Különböző változataik léteznek, melyeknek egyszerűbb kialakításait különböző nemzetközi szabványok rögzítik. Ilyenek az ASME több szabványa, mint a BTH-1 (Design of Below-the-Hook Lifting Devices), AISC 360 ASD, vagy éppen az ISO 16841 vonószemekre vonatkozó előírásai.

Számos szakkönyv és tanulmány foglalkozik az emelőfülek, és a hozzájuk kapcsolódó feladatok megoldásával különféle szempontokból. Az alapvető problémák leírásait megtalálhatjuk például az [1-3] könyvekben, de találunk megoldásokat számos specifikus szerkezet esetén is, mint amilyenek az [4-8]. Manapság szintén népszerű az emelőfülek különböző szempontok szerinti optimalizációja is. Ezekre találunk példákat a [9, 10] tanulmányokban. A kontaktfeladatok végeeselemes analízise (pl. [11, 12]) is releváns mérnöki probléma, melyek a szilárd testek érintkezésének modellezését célozzák, ami az erős nemlinearitása révén az egyik legösszetettebb numerikus problémakör, iteratív, konvergenciára érzékeny algoritmusokat igényel, amelyek jelentős számítási erőforrást követelnek. A mérnöki tervezés során az

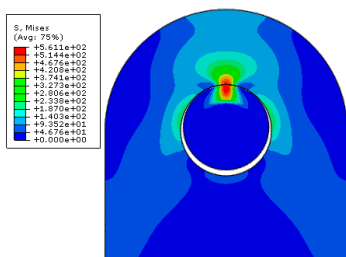
alapfeladatokban legtöbbször az emelőfülek geometriáját, méreteit és anyagát az emelési terhelés, az emelési szög, valamint a függeszték és a daru konfigurációja alapján határozzák meg. Az emelőfülek helyes tervezése nemcsak a statikus teherbírást, hanem az üzembiztonságot és kezelhetőséget is szolgálja. A helytelenül elhelyezett vagy alulméretezett fül balesetveszélyt jelenthet.

Számos olyan esettel találkozhatunk, ahol a szabványok közvetlenül nem alkalmazhatók, vagy más jellemzőkre is kíváncsiak vagyunk (pl. feszültségeloszlás) így numerikus szimulációkat kell alkalmaznunk a tervezési folyamat során. Ez a tanulmány a különböző szerkezeti elemek emeléséhez használt (főként hengeres) kontaktfelületek numerikus vizsgálatával foglalkozik. A probléma modelljét az Abaqus CAE, kereskedelmi forgalomban kapható végeeselem szoftverrel készítjük el. Körbejárunk néhány alapvető kérdést az emelőfülek modellezésével kapcsolatban. Megvizsgáljuk a modern végeeselemes szoftverrendszerek által nyújtott néhány modellezési lehetőséget, valamint ezek alkalmazásainak lehetőségeit komplexebb problémák esetére, mint amilyenek a optimalizációs és szimuláció automatizálási feladatok, vagy éppen a modern mérnöki anyagok (pl. kompozitok és funkcionálisan gradiens anyagok) alkalmazása.

2. KÉTDIMENZIÓS MODELL

Egyszerű geometriájú esetekben az érintkezési viszonyok is könnyen számíthatók az alapvető képleteink segítségével (pl. [1], [2]). Amennyiben végeeselemes szoftverben szeretnénk megvizsgálni a problémát, síkfeszültségi állapotot tudunk használni. Vegyük az egyes ábrán látható emelőfület. Legyen a rendszer mindkét komponensének anyaga acél ($E = 200 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$). A csap átmérője 30 mm, a fül furata 32 mm, a külső pereme 85 mm átmérőjű. A vastagsága legyen 2 mm. Ebben az esetben az elmozdulás vezérlés működik stabilan, amennyiben erőt szeretnénk a belső csapra előírni, a szoftver általában nem fog megoldást találni és hibával kilép. Ez azt jelenti, hogy a csapra előírunk egy adott síkbeli irányú elmozdulást, amíg az emelőfület lerögzítjük (a mi esetünkben az alsó sík peremfelületet befalasztuk). Az 1. ábrán látható a 8,4 kN vonóerő (0,1 mm érintkezés utáni elmozdulás) esetén kialakuló feszültségeloszlás. Az így kapott értékek jó

* adjunktus, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet



1. ábra. A kétdimenziós, síkfelületi modell

egyeztetést mutatnak az analitikus megoldásokkal.

A síkalakváltozási feladatok ritkán használhatók a geometriai és terhelési megkövetések miatt. Természetesen a kétdimenziós modellek nagy előnye, hogy rendkívül gyorsan megoldhatók és egyszerűek.

A kontaktfeladat definiálására több lehetőségünk is van az Abaqus CAE szoftverben [13]. Az általános kontakt (*General Contact*, melyet a kezdeti konfigurációban adunk meg) esetén egyetlen definícióval a modell számos vagy akár minden régiója között érvényesíthetők az érintkezési előírások. Kontaktpárok (*Contact Pairs*) esetén csak felülepár közötti kontaktus írható le, ezeket a felhasználónak kell definiálnia. A harmadik típus a kontaktelemelek (*Contact Elements*) módszere. Mindegyik megközelítésnek megvannak a maga előnyei és korlátai. Az általános kontakt sokkal rugalmasabb módszer, mivel egyetlen interakcióval leírható az egymástól független testtartományok közötti érintkezés. A kontaktpárok ezzel szemben nagyobb körültekintést igényelnek a felületek definiálásakor, és számos korlátozás vonatkozik az alkalmazható felülettípusokra. Az Abaqus programban a felhasználónak minden kontaktpárhoz meg kell adnia egy master felületet és egy slave felületet. A két típus közötti különbségek között említhetjük általánosságban, hogy a slave felület csomópontjai nem hatolhatnak át a master felületen. Az analitikus merev felületek és a merev elemalapú felületek mindig master felületként kell, hogy szerepeljenek. A csomópontalapú felületek slave felületként működhetnek, és mindig csomópont-felület típusú kontaktust alkalmazunk. Egy kontaktpárban mindkét felület nem lehet merev. Általában, ha egy kisebb felület érintkezik egy nagyobb, célszerű a kisebb felületet slave-ként definiálni. A master felületek legyenek sima függvényekkel leírható geometriájúak. A slave felület hálóját legyen finomabb. Azonos hálósűrűség esetén a slave felületet úgy érdemes kiválasztani, hogy az alacsonyabb merevségű legyen. Ha a két felület összehasonlítható merevségű szerkezeteken helyezkedik el, a master felület legyen a durvább hálójú oldal. A szerkezeti merevséget (nem csak az anyagot) is érdemes figyelembe venni a master-slave viszony kijelölésekor.

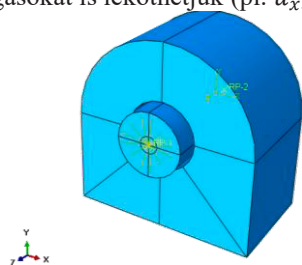
Az általános kontakt előírás esetében a program automatikusan rendeli hozzá a master és a slave szerepeket a felületekhez, de a felhasználó felülbíráhatja bizonyos beállításokat más opcióval együtt.

A kontakt előírásokhoz interakciós tulajdonságokat (*interaction properties* [13]) kell rendelnünk, amelyeknél megadhatjuk az érintkezés jellegét. A mi esetünkben normál irányban (amerre a behatolással szembeni ellenállást írhatjuk elő) *hard contact*-ot használtunk, felületi irányban pedig súrlódásmentes és súrlódásos eseteket is vizsgáltunk. Emellett hőkontakt is előírható termomechanikai feladatokhoz. Ezek esetében különböző függőségek is megadhatók [13]. Az érintkezés leírásához három alapvető karakterisztikát kell kiválasztani. A kontakt diszkrétizációjának jellegét, amely lehet csomópont-felület, vagy felület-felület. A csomópont - felület (*node-to-surface*) diszkrétizáció esetében minden slave csomópont a kontaktfelület túoldalán lévő master felületen egy projekciós ponttal lép kölcsönhatásba adott előírásoknak megfelelően. Felület-felület interakció figyelembe veszi mind a master, mind a slave felület geometriáját, így pontosabb eredményeket szolgáltat, mint az előző módszer. A kontaktfeltételeket a slave csomópontok környezetében átlagolt régiókra írja elő, ami kis lokális behatolásokat enged csak meg, de nagyobb áthatolásokat megakadályoz, és a közelben lévő slave csomópontok átlagolt felületi normálvektorára támaszkodik. A másik fontos módszer a kontaktkövetés, amely jelentős hatással van arra, hogyan lépnek kölcsönhatásba a kontaktfelületek. Ez lehet véges csúszás vagy kis elmozdulás. A véges csúszású (*finite sliding*) követési módszer a legáltalánosabb megközelítés, amely lehetővé teszi a kontaktfelületek tetszőleges elválását, csúszását és elfordulását. A módszer során a jelenleg aktív kontaktfeltételek kapcsolódása a felületek relatív elmozdulása során változik. Ezzel szemben a kis elmozdulású (*small sliding*) módszer a master felület lineáris közelítését használja minden egyes kontaktfeltételhez, ezért csak kis relatív elmozdulást enged a felületek között, és akkor használandó, ha csökkenteni szeretnénk a számítási igényt és ezzel a megoldási időt. Az általunk használt általános kontakteleírás alapértelmezetten felület - felület típusú, véges elmozdulású kontaktfelületet alkalmaz.

3. HÁROMDIMENZIÓS MODELLEK

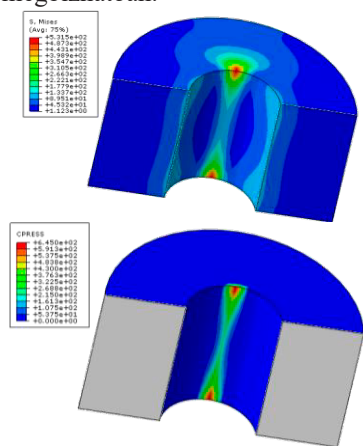
Tekintsük az előző feladatunkat, de egészítsük ki a 2. ábrán látható módon. A csap vizsgált hossza legyen 70 mm, a fül vastagsága 50 mm. Ebben az esetben csap két sík peremfelületét hozzákötöttük egy-egy referenciaponthoz. Ezt az Abaqus CAE szoftverben többféleképpen is megtehetjük. Amennyiben elmozdulást szeretnénk előírni, kinematikai kapcsolatot (*coupling*), amennyiben erőt szeretnénk előírni egy felületre egy ponton keresztül kontinuum kapcsolatot ajánlott alkalmazni. Ezt szemlélteti a 2. ábra RP1 referencia pontra vonatkozó előírása. Ebben az esetben is általános kontaktot írtunk elő, a súrlódási tényező kezdeti értéke 0,3 volt. A kezdeti hézag a két elem között legyen 1 mm. Írjunk elő a csapon 1,1 mm elmozdulást y irányban (az RP-1 és RP-2 referencia-

pontokon, és azokon keresztül a szélső sík peremeken), ezen felül ugyanitt a z és x irányú elmozdulásokat és/vagy a forgásokat is leköthetjük (pl. $u_x, u_{rot z}$).



2. ábra. A probléma háromdimenziós geometriája

Először a közelítő számításokhoz egy durvabb hálót (4104 lineáris *hexahedral* elem) alkalmaztunk, amely esetén a maximális von Mises redukált feszültség 303 MPa, a maximális kontaktnyomás 479 MPa lett. A konvergenciavizsgálat elvégzése után az alkalmazott finomabb (optimálisabb) háló 16032 elemből állt. Az így kapott eredményeket szemlélteti a 3. ábra. A háromdimenziós eloszlásokat tekintve jól látható, hogy a változóink függenek a z iránytól, így ebben az esetben a kétdimenziós megközelítés már nem ad pontos megoldást. A súrlódási tényező hatására ($\mu = 0,3; 0,15; 0$) a maximális redukált feszültség (531,534,557MPa), a kontaktnyomás maximuma (645,599,579 MPa) értékeket vett fel. Ebben az esetben is elmondható, hogy tisztán erő megadásával a szimuláció nem fut le, azaz ismét az elmozdulásvezérlés használható megbízhatóan.

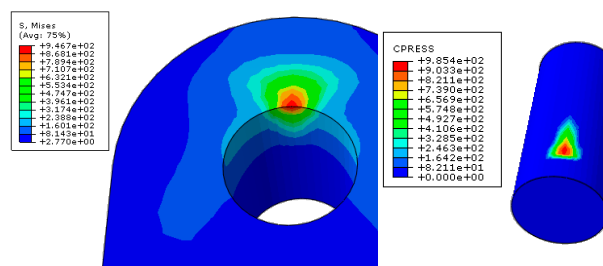


3. ábra. Az emelőfül eredményei, a von Mises-féle egyenértékű feszültség és a kontaktnyomás

Így inverz módon a reakcióerőkből történő visszszámolással tudhatjuk meg az erő értékét, amihez használhatjuk a két referenciapontunkat (az Abaqus CAE csomóponti *field output* opciója segítségével). Az emelőfül falvastagságát is érdemes vizsgálnunk a tervezés folyamán. Ennek vizsgálatához az Abaqus CAE preprocessorát tudjuk használni, amely egy grafikus felhasználói felület (GUI) réteggel biztosítja az interaktív modellező környezetet, a menüket és a nézetablakot a geometria, a hálózás és az eredmények vizualizálásához. A GUI C++ nyelven van

implementálva, és Python-horgokkal kombinálva, így gyakorlatilag minden GUI-művelet megfelel egy Python parancsnak. Ezen API réteg révén a felhasználó hozzáfér a program számos funkciójához, objektumához és metódusához. Az Abaqus/CAE-ben található egy beágyazott Python interpreter, ami a „ragasztó” szerepét tölti be a GUI és a szimulációs megoldó modul (*solver*) között, lehetővé téve a teljes automatizálást, testreszabást, valamint a külső munkafolyamatokkal történő integrációt. Az Abaqus CAE rendszer a beépített Python csomagokat több mint 500 osztállyal (objektummal) és számos, ezek között működő metódussal bővíti [14]. A felhasználók külső szkripteket használhatnak, például adatokat exportálhatnak fájlalba, feldolgozhatják azokat külső vagy a szoftver beépített Python környezetében, majd visszatölthetik az Abaqus-ba. Ez az API architektúra objektum-orientált, lefedi a geometriát, hálózást, terhelést, analízist és utófeldolgozást. Számos fontos alkalmazási terület van a Python szkriptelés számára. Ilyen lehet az emelőfüleknél is aktuális parametrikus modellezés, amely során a geometriai modelleket és hálókat programozott módon, bemeneti paraméterek alapján hozhatjuk létre, amit utána optimalizációs eljárásokhoz használhatjuk, hiszen az eredmények feldolgozása is lehetséges szkriptek segítségével (*odb* objektumokon keresztül). Batch futtatások is megoldhatók velük, automatizálható több szimuláció beállítása és végrehajtása, például tervezési tanulmányoknál, amikor sok modellvariánst kell elemezni manuális beavatkozás nélkül, vagy neurális hálózatok betanításához szükséges adatok generálásakor.

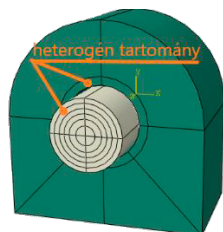
A következő kérdés, hogy mi történik akkor, amikor az erő nem az emelőfül (xy) síkjában ébred, hanem van annak z irányú komponense is. Ebben az esetben a csap elmozdulása nem tisztán y irányú. Mivel az erővel történő vezérlés általában nem működik, így más megoldást kell használnunk. Az egyik lehetőségünk, hogy a csap egyik oldalát egy adott pozícióban lerögzítjük gömbcsuklóval (pl. RP-2-nél), a másik referenciaponton keresztül kontinuum elosztással pedig előírhatunk koncentrált erőt. Ezzel akár azon szélsőséges esetek is modellezhetők, amikor a csap hirtelen egy kisebb felületen érintkezik a füllel. A 4. ábra azt az esetet mutatja, amikor az RP-2 oldalt a fül furatához pozícionáltuk és rögzítettük a translációit, majd 50 kN terhelést tettünk y irányba a másik (RP-1) peremre, miközben a súrlódási tényező kis értékű(0,05).



4. ábra. A ferde erő hatása a kontaktra

Itt megjegyzendő, hogy nagyobb sűrűlási tényezők esetén a szimuláció nem futott le. A modellhez lineáris anyagmodellt használtunk, amennyiben képlékeny állapotegyenleteket is bevetünk, a feszültségeloszlás más lett volna. Ha a képlékeny alakváltozást tönkremeneteli feltételnek vesszük, ez a rész egyébként sem releváns számunkra, ezt a terhelést csak nagyszilárdságú acélok viselnék el.

Amennyiben elő akarunk írni ferde elmozdulást, akkor a két referenciaponton különböző elmozdulásértékeket kell beállítanunk. Alternatívaként hozható még a csap egy belső hengeres részének kiválasztása (mint partíció) és annak az elmozdulásmezőjének az előírása. Amennyiben a teljes csap elmozdulásmezőjét megadjuk, az nem tud deformálódni, így merev testként viselkedik. Ekkor célszerűbb diszkrét merev testmodellt alkalmazni, hiszen az analitikusan merev megközelítés a kontakt miatt nem szerencsés. Amennyiben modern mérnöki anyagokat használunk, mint a kompozitok, vagy éppen a funkcionálisan gradiens anyagok, a szkriptelő környezetet tudjuk használni. Itt említhető, hogy funkcionálisan gradiens anyagok esetén például az összetétel változásának megfelelően a geometriát felparticionálhatjuk (programozott módon), majd ezekhez hozzárendelhetők homogén anyagi szekciók, hogy közelítsük az eredeti anyagi viselkedést. Erre mutat példát az 5. ábra, ahol egy radiálisan gradiens csapot egy kompozit fölbe helyeztünk.



5. ábra. A heterogén anyagú szerkezet egy példája

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány a különböző szerkezeti elemek emeléséhez használt (főként hengeres) kontaktfelületek numerikus vizsgálatával foglalkozik Abaqus CAE programrendszer segítségével. Néhány példán keresztül ismertettük a modell elkészítésének kérdéseit, a szoftverrendszer által nyújtott lehetőségek (mint amilyen a szkriptelési környezet) alkalmazási lehetőségeit.

5. SUMMARY

The study focused on the FE investigation of structural components used in the lifting of various structural elements using Abaqus CAE. A few basic examples with their numerical difficulties are presented. Furthermore, several modeling capabilities provided by modern finite element software systems are examined, along with their potential applications to more complex problems, such as optimization, simulation automation

tasks, and the use of advanced engineering materials (e.g., composites and functionally graded materials).

6. IRODALOM

- [1] Timoshenko S. P., Goodier, J. N.: *Theory of Elasticity*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1970
- [2] Boresi A. P., Sidebottom O. M., Seely, F. B., Smith, J. O.: *Advanced Mechanics of Materials*, 3rd ed., Wiley, New York, 1978
- [3] ASME: *Below-the-Hook Lifting Devices*, ASME, New York, ASME B30.20, 2025, ISBN: 9780791876923
- [4] Duerr D.: *Lifting lug with pinhole bushing*. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 23(2), 2018, 04018008, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000367](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000367)
- [5] Williams, D. K.: *Proposed design criterion for vessel lifting lugs in lieu of ASME, B30., 20., 2007.*
- [6] Joo-Sung L.: *On the Design of Lifting Lugs Based on the Ultimate Strength*, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, 29(1), 2016, pp. 29-36, <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2016.29.1.29>
- [7] Ham, J. H.: *The basic structural design guides on the lifting lug of ship block*. In ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, 1998, pp. ISOPE-I-98-339.
- [8] Samir Mohamed Mohamed Soliman E.: *Modal and stress behavioral for CFRP composite lifting lug*. World Journal of Engineering, 22(2), 2025, pp. 307-321, <https://doi.org/10.1108/WJE-08-2023-0312>
- [9] Lee S. M., Roh M. I., Kim K. S., Ham S. H.: *Optimum design of lug arrangement based on static and dynamic analyses for block lifting*. Journal of Ship Production and Design, 34(02), 2018, pp. 119-133, <https://doi.org/10.5957/JSPD.160043>
- [10] He Q., Guo Y., Jian Z., Zhou H., Li L.: *Research and Optimization on Arranging Lifting Lugs Algorithm in Designing Hull Block Lifting Scheme Based on SPD Secondary Development*. Journal of Ship Production and Design, 41(2), 2025, pp. 47-64, <https://doi.org/10.5957/JSPD.05240014>
- [11] Kiss L. P.: *The Effect of Various Imperfections on the Buckling of an Aerosol Can*. Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering, 13(1), 2020, pp 49-52
- [12] Gönczi, D.: *The Influence of the Boundary Conditions on the Buckling of Thin-walled Cans during Manufacturing*. International Journal of Engineering and Management Sciences, 7(4), 2022, pp. 41-50, <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2022.4.4>.
- [13] *Abaqus 6.13 online documentation*. Dassault Systems. 2015.
- [14] *Abaqus 2016. Scripting user's guide*. Dassault Systems. 2016.