



XII. MAGYAR MECHANIKAI KONFERENCIA

MaMeK, 2015

Miskolc, 2015. augusztus 25-27.

REPÜLŐGÉP NAGY MEREVSÉGŰ SZERKEZETBE TÖRTÉNŐ ÜTKÖZÉSÉNEK LÉNYEGES PARAMÉTEREI

Laczák Lili Eszter¹, Károlyi György²

¹ BME, Hidak és Szerkezetek Tanszék

1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

laczak.lili@epito.me.hu

² BME, Nukleáris Technikai Intézet

1111 Budapest, Műegyetem rkp. 9.

karolyi@reak.bme.hu

Absztrakt: Repülőgép-ütközés hatásainak elemzésére legtöbbször numerikus modelleket alkalmazunk, amelyekben számos paraméter jelenik meg, így lényeges kérdése lehet annak eldöntése, hogy ezek közül melyek az elsődlegesen fontosak. Cikkünkben az ütközés globális hatását vizsgáljuk a széles körben elterjedt Riera-modell rugalmas célszerkezettel bővített változatán. Azt vizsgáljuk, hogy mely esetekben és milyen mértékben biztonság kárára történő közelítés a célszerkezetet végtelen merevnek tekinteni, vagyis mikor haladhatja meg a rugalmas célszerkezetre ható reakcióerő a végtelen merev esetben tapasztalható. Megadunk egy közelítő analitikus formulát is megadunk az ilyen esetek felismeréséhez.

Kulcsszavak: repülőgép-ütközés, ütközés globális hatása, rugalmas célszerkezet, Riera-modell

1. BEVEZETÉS

Napjainkban repülőgépek nagy merevségű szerkezetekbe történő ütközésének modellezése elsősorban összetett numerikus modellekkel történik, melyek valóságos repülőgépek geometriájával és tulajdonságaival dolgoznak [1, 2]. Ezekben a modellekben számos paraméter jelenik meg, így nehéz eldönteni, hogy melyek az igazán lényeges jellemzők. Az ütközés folyamatát döntően befolyásoló tényezők megismerése viszont lényeges lehet magának a jelenségnek a globális megértéséhez, realisztikus numerikus modellek készítéséhez. Cikkünkben az ütközés során a nagy merevségű célszerkezetre ható időfüggő terhet vizsgáljuk. Ennek meghatározására a széles körben elfogadott és alkalmazott analitikus modell a Riera-modell [3], mely végtelen merev célszerkezetet feltételez. A Riera-modellt alapul véve azt vizsgáljuk, hogy rugalmas deformációkra képes célszerkezet esetén a kapott reakcióerő-függvények milyen mértékben térnek el a merev esetben kapottaktól. Ily módon megvizsgáljuk, hogy milyen mértékben tévedhetünk a biztonság kárára vagy javára, ha a célszerkezetet merevnek tekintjük.

2. RUGALMAS RIERA-MODELL

Repülőgép-ütközések elemzéséhez régóta széles körben elterjedt modell a Riera-modell [3], mely végtelen merev célszerkezetbe történő repülőgép-ütközést vizsgál. Nem merőleges ütközés esetén az ütközés során fellépő erők csökkennek, ezért a biztonság javára történő közelítés a merőleges becsapódás feltételezése. A modell előnye, hogy adott tömegeloszlású és törési ellenállású gép esetén a célszerkezetre ható, időben változó reakcióerő közvetlenül számítható az alábbi módon:

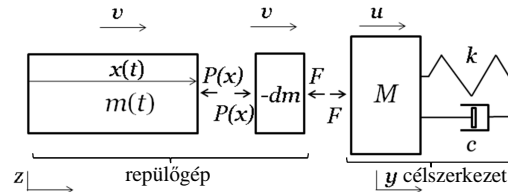
$$F(t) = P(x(t)) + \mu(x(t)) \left(\frac{dx}{dt} \right)^2, \quad (1)$$

ahol $F(t)$ a falra ható reakcióerő, $x(t)$ a még ép géprész hossza, $P(x)$ és $\mu(x)$ pedig az éppen eltörő keresztmetszet törési ellenállása, illetve fajlagos tömege. A $P(x)$ törési ellenállás a gép orrától számított x távolságban levő keresztmetszet tönkremeneteléhez tartozó törőerő, ami függ egyrészt a keresztmetszet anyagának teherbírásától, másrészt a törés részleteitől, vagyis hogy milyen módon hajlik ki törés közben a keresztmetszet. Ezt a mennyiséget a törési folyamat mérése alapján lehet meghatározni [4]. A fajlagos tömeg a repülőgép törzsének egységnyi hosszára eső tömeg, ami szintén x függvénye. A Riera-modell puha ütközések globális hatásának elemzéséhez használható, tehát azokban az esetekben, amikor a repülő deformációi lényegesen nagyobbak, mint a célszerkezeté, illetve elhanyagolhatóak a lokális hatások (keményebb lövedék miatti penetráció, perforáció stb.).

Annak érdekében, hogy a célszerkezet lehetséges deformációinak hatását is figyelembe vehessük, Wolf [5]

nyomán egy-dimenziós rezgőrendszerrel modelleztük a célszerkezetet [6], amelynek jellemzői az a következők: k rugóállandó, M tömeg, c csillapítás. Az 1. ábrán a rugalmas célszerkezettel bővített Riera- modell látható.

A modellben szereplő (eddig nem definiált) jelölések: $m(t)$ és $v(t)$ a gép ép részének tömege és sebessége, dm az éppen összetörő géprész tömege, $y(x)$ és $u(t)$ a célszerkezet elmozdulása és sebessége. A modell három részből épül fel: az ütközése során az ép részből egy dm tömegű rész letörik, az ép rész pedig P erő hatására lelassul. Eközben, képlékeny ütközést feltételezve, dm lelassul a célszerkezet sebességére, mialatt P és F erők hatnak rá, a célszerkezet pedig egydimenziós rezgőrendszerként mozog az $F(t)$ időben változó gerjesztés hatására.



1. ábra. A rugalmas célszerkezettű Riera-modell

Annak érdekében, hogy az ütközés lefolyását lényegesen befolyásoló paramétereket megtaláljuk a modell paramétereit korábbi cikkünkben [6] dimenziótlan alakban írtuk fel. Az egyszerűség kedvéért a továbbiakban egyenletes tömegeloszlású és törőterhű ($P=$ áll., $\mu=$ áll.) repülő vizsgálunk, és elhanyagoljuk a célszerkezet csillapítását ($c=0$). Dimenziótlan alakban az alábbi egyenletrendszer írja le az ütközést (x, y, t a korábbiakkal ellentétben itt dimenzió nélküli, fajlagos értékeket jelöl) [6]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{x} + \varepsilon \left[1 + \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - \kappa y \right], \quad \frac{d^2y}{dt^2} = \varepsilon \left[1 + \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - \kappa y \right], \quad (2)$$

ahol $\varepsilon = m_0/M$ a repülő kezdeti tömegének és a célszerkezet tömegének aránya, $\kappa = kL/P_0$, ahol L a gép hossza, P_0 a törési ellenállás jellemző értéke. A fenti egyenletekből $x(0)=y(0)=dy/dt(0)=0$, valamint az ütközés dimenziótlan kezdősebességére vonatkozó:

$$v_0^* = \frac{dx}{dt}(0) = -v_0 \sqrt{\frac{m_0}{LP_0}} \quad (3)$$

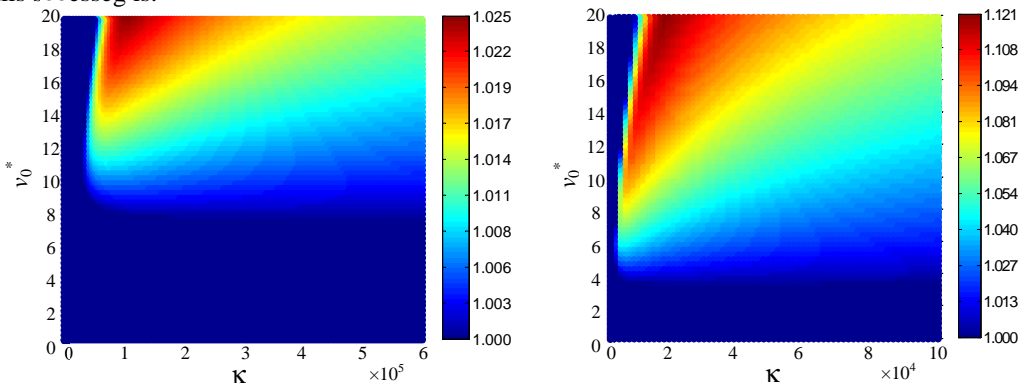
kezdeti feltételekből (v_0 a kezdősebesség dimenziós értéke) f dimenziótlan reakcióerő az alábbi formában kapható:

$$f(t) = 1 + \left(\frac{dx}{dt} \right)^2. \quad (4)$$

3. A MAXIMÁLIS REAKCIÓERŐ-ÉRTÉKEK PARAMÉTERES VIZSGÁLATA

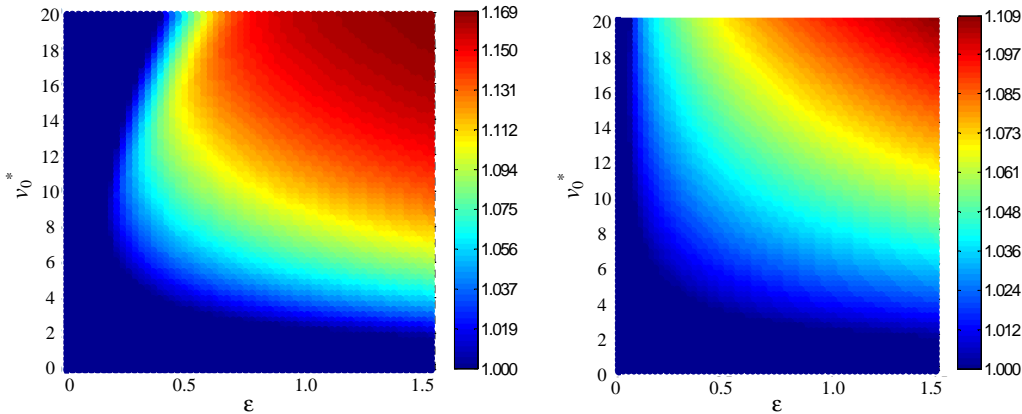
A (4) egyenletben látható, hogy a dimenziótlan reakcióerő első sorban a törés sebességétől függ, ami a gép ép részének és a célszerkezet sebességének különbsége. Egyenletes tömegeloszlású és törőterhű gépnél, végtelen merev célszerkezettű Riera-modellben ($y=u=0$) minden esetben az ütközés pillanatában keletkezik a legnagyobb reakcióerő, melynek dimenziótlan értéke: $f(0)=1+(v_0^*)^2$. Rugalmas célszerkezet esetében azonban előfordulhat, hogy a repülővel szemben mozgó célszerkezet miatt a kezdeti reakcióerőnél nagyobb érték adódik. A következőkben azt fogjuk megvizsgálni, hogy rugalmas célszerkezet alkalmazása esetén milyen mértékű eltéréseket tapasztalunk a reakcióerő időbeli lefutásában a végtelen merev célszerkezet esetéhez képest. Az eltérés mérőszámának a maximális és a kezdeti reakcióerő arányát ($f_{\max}/f(0)$) választjuk. A széles skálán változtatott paraméterek v_0^* , κ , ε lesznek.

A 2. és 3. ábrákon az látható, hogy hogyan változik az $f_{\max}/f(0)$ arány különböző paraméterértékek esetén. Minden esetben látható, hogy kis sebesség, tömegarány, illetve rugalmasság esetén a kezdeti sebesség egyben a maximális sebesség is.

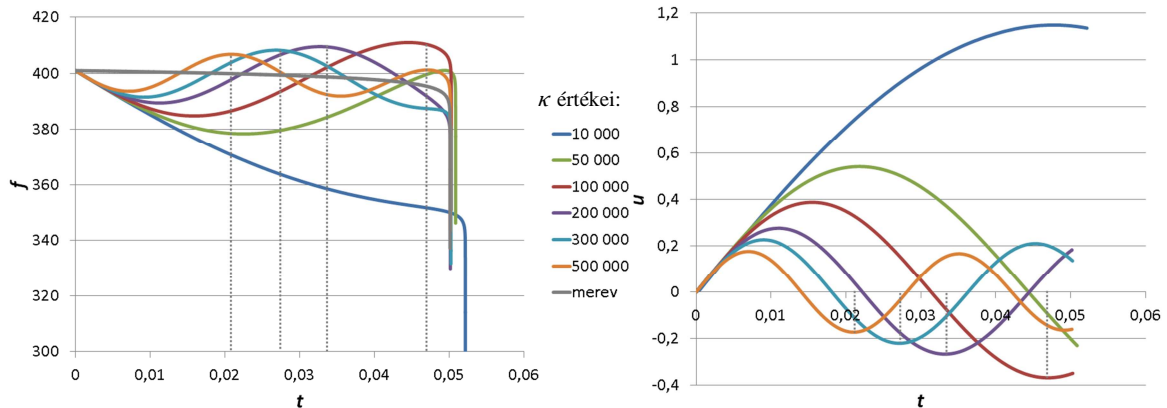


2. ábra. Az $f_{\max}/f(0)$ arány változása $\varepsilon=0.1$ (balra) és $\varepsilon=0.5$ (jobbra) esetén különböző κ - v_0^* értékpárok esetén színekódolással jelölve

Ha ε kicsi, vagyis a célszerkezet tömege nagy a repülőéhez képest, a célszerkezet a merev esethez közelít. Ha a sebesség kicsi, akkor a gép intenzíven lassul, ezáltal a reakcióerő is hirtelen csökken. Látható, hogy nagyobb kezdeti sebesség és ε tömegarány esetén minden esetben f_{\max}/f_0 is növekszik. A κ fajlagos rugalmassági modulus hatása azonban nem ennyire egyértelmű. Ennek a jelenségnek a vizsgálatához a reakcióerő időbeli lefolyását vizsgáljuk $\varepsilon=0.1$, $v_0^*=20$ esetben (ekkor $f(0)=1+20^2=401$). Az eredményeket a 4. ábra mutatja, ahol az $f(t)$ grafikonokat vethetjük össze a célszerkezet $u(t)$ dimenziótlan sebességének időbeli alakulásával. Az u értéke pozitív, ha a célszerkezet a repülővel azonos irányban halad. Látható, hogy viszonylag kis célszerkezet merevségek ($\kappa=10000$) esetén a célszerkezet mindvégig a repülővel azonos irányban halad, így a gép törési sebessége és emiatt a reakcióerő mindvégig kisebb lesz, mint a merev esetben mérhető. Azokban az esetekben, amikor a célszerkezet a repülővel ellentétes irányban is halad, a maximális törési sebesség és reakcióerő akkor keletkezik, amikor a célszerkezet először fordul szembe és visszafelé haladva (negatív) sebességének abszolút értéke maximális.



3. ábra. Az $f_{\max}/f(0)$ arány változása $\kappa=10\,000$ (balra) és $\kappa=100\,000$ (jobbra) esetén különböző ε - v_0^* értékpárok esetén



4. ábra. Dimenziótlan reakcióerő-idő és célszerkezet-sebesség – idő függvények különböző κ értékek esetén ($\varepsilon=0.1$, $v_0^*=20$)

A 4. ábra alapján látható, hogy a maximális reakcióerő akkor lép fel, amikor a negatív sebességmaximumot a törési folyamat végén érjük el. Rögzített ε esetén ennél az esethnél kisebb κ -nál nem alakul ki negatív sebességmaximum, nagyobb κ esetén pedig a sebesség-amplitúdók lesznek kisebbek.

Ha a célszerkezet mozgását konstans erővel való gerjesztés miatti harmonikus rezgőmozgásnak feltételezzük, akkor a célszerkezet elmozdulása, sebessége és maximális sebessége:

$$y = \frac{f(0)}{\kappa} (1 - \cos(\omega t)) = \frac{f(0)}{\kappa} (1 - \cos(\sqrt{\kappa\varepsilon} t)), \quad (5)$$

$$u = \sqrt{\kappa\varepsilon} \frac{f(0)}{\kappa} \sin(\sqrt{\kappa\varepsilon} t), \quad (6)$$

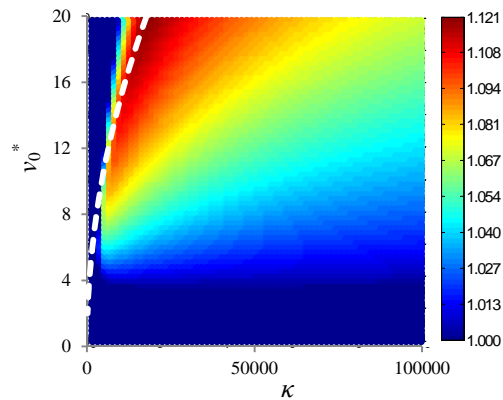
$$u_{\max} = -\sqrt{\frac{\varepsilon}{\kappa}} f(0). \quad (7)$$

A (7) egyenletből látható, hogy kisebb κ merevség nagyobb sebességet eredményez, azonban ahhoz, hogy ez a sebesség kialakuljon az is szükséges, hogy még az ütközés vége előtt eljussunk a rezgés periódusának $3/4$ részéhez. Ha lassulás nélküli ütközést feltételezzük, akkor κ határértékére az alábbi adódik:

$$\frac{3}{4}T = \frac{3}{4} \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{\kappa\varepsilon}} \leq \frac{1}{v_0^*}, \quad (8)$$

$$\kappa \geq \frac{(1.5\pi v_0^*)^2}{\varepsilon}. \quad (9)$$

A (9) egyenletből számított maximális reakcióerőt adó κ - v_0^* értékpárokat ábrázoltuk az 5. ábrán $\varepsilon=0.1$ esetén. A kapott értékek jól közelítik a 2. ábrán látható maximális értékekhez tartozó helyeket. A 4. ábrán ábrázolt esetben a (9) formula $\kappa=88826$ értéket ad, ami szintén jól becsüli a grafikonról leolvasható maximális arányhoz tartozó κ értéket. Fontos megjegyezni, hogy a közelítéseink csak akkor nem okoznak jelentős hibát, ha a gép gyakorlatilag lassulás nélkül törik el (a valós törési tesztek [4] alapján egy leszállási sebességgel becsapódó vadászgép így törik össze).



5. ábra. Maximális $f_{\max}/f(0)$ reakcióerő-arányhoz tartozó κ - v_0^* ($\varepsilon=0.5$) értékpárok (a színek a pontos számítás $f_{\max}/f(0)$ értékeit, a szaggatott vonal a becsült maximumhelyeket jelöli)

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben azt vizsgáltuk, hogy repülőgép-ütközés vizsgálatok milyen mértékű hibát okozhat az, ha a célszerkezetet végtelen merevnek tekintjük. Vizsgálatainkhoz a szerkezetre ható reakcióerőt a Riera-modell segítségével vizsgáltuk, kiegészítve a modellt úgy, hogy a célszerkezet egy szabadságfokú rezgőrendszer volt. Homogén tömegeloszlású és törőterhű repülő esetén dimenziótlan alakban vizsgáltuk az ütközési sebesség (v_0^*), gép-célszerkezet tömegaránya (ε) és célszerkezet-rugalmasság (κ) hatását. A kezdősebesség és tömegarány növelésével a maximális reakcióerő és a kezdeti reakcióerő aránya nő, míg a rugalmassági modulusok vizsgálatokhoz egy adott (ε , v_0^*) értékpárhoz tartozó határrugalmasság értékig nő, majd csökken. A határrugalmasságnál lényegesen kisebb κ értékek esetén a célszerkezet mindvégig a repülővel azonos irányban tér ki, így a merev célszerkezethez számított reakcióerő konzervatív becslést ad. A határrugalmasság környezetében a becslés a biztonság kárára is történhet, a vizsgált tartományon 10-15%-kal is túllépte a reakcióerő maximuma a kezdeti értéket. A határrugalmasságnál lényegesen nagyobb κ értékek esetén a célszerkezet elegendően merev ahhoz, hogy a végtelen merev szerkezettel kapott becslés megfelelő legyen.

HIVATKOZÁSOK

- [1] J. ARROS, N. DOUBLASKI. Analysis of aircraft impact to concrete structures. *Nuclear Engineering and Design*, 237: 1241–1249, 2006.
- [2] M. KOSTOV, F.O. HENKEL, A. ANDONOV. Safety assessment of A29 reactor building for large commercial aircraft crash. *Nuclear Engineering and Design*, 269: 262–267, 2014.
- [3] J.D. RIERA. On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces. *Nuclear Engineering and Design*, 8: 415–426, 1968.
- [4] T. SUGANO, H. TSUBOTA, Y. KASAI, N. KOSHIKA, H. OHNUMA, W.A. RIESEMANN, D.C. BICKEL, M.B. PARKS. Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 1. Test program, method and results. *Nuclear Engineering and Design*, 140: 387–405, 1993.
- [5] J.P. WOLF, K.M. BUCHER, P.E. SKRIKERUD. Response of equipment to aircraft impact. *Nuclear Engineering and Design*, 47: 169–193, 1978.
- [6] L.E. LACZÁK, Gy. KÁROLYI: A systematic parametric study of aircraft impact into elastic structures. Közlésre benyújtva, 2015.