

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Nagy merevségű szerkezetbe történő repülőgép-becsapódás jellemző paraméterei

Összefoglalás és tézisek

Laczák Lili Eszter

Témavezető: Dr. Károlyi György

Budapest, 2017

Tartalom

1.	Bevezetés	1
1.1.	Motiváció.....	1
1.2.	Repülőgép-becsapódás hatásai	1
1.3.	Célkitűzések.....	3
2.	A Riera-modell paramétervizsgálata	3
3.	A károsodási potenciál szerepe puha ütközés végeselemes modelljében.....	6
4.	Valós repülőgép jellemzők hatása	8
5.	Kemény lövedékek lokális hatásai.....	9
6.	További kutatási irányok	9
Hivatkozások		12
Publikációk az értekezés témakörében		12
Az összefoglalásban szereplő publikációk		12

1. Bevezetés

1.1. Motiváció

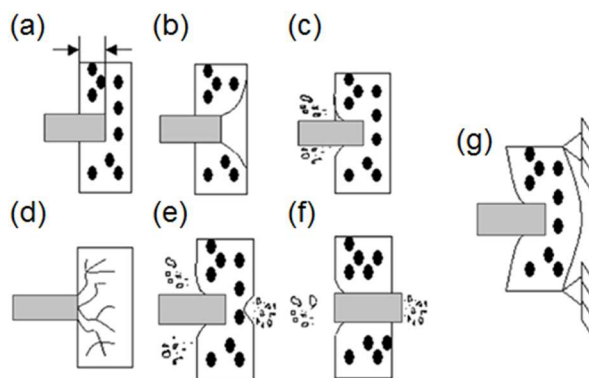
Az építőmérnöki szerkezetekbe történő repülőgép-becsapódások elemzése nagy fontosságú kutatási terület. Ilyen események valószínűsége kicsi, azonban a következmények nagyon súlyosak lehetnek. Ennek megfelelően ilyen vizsgálatok megjelennek nagy fontosságú építőmérnöki létesítmények, például atomerőművek tervezési előírásaiban (IAEA, 2003 (a Nemzetközi Atomenergia-ügynökség biztonsági szabályzata); DOE, 2006 (a Szövetségi Energetikai Hivatal (USA) szabványa); NEI, 2011 (a Nukleáris Energia Intézet ajánlása)). Sajnálatos módon a közelmúlt terrortámadásai szintén növelik ilyen vizsgálatok aktualitását.

Repülőgép-becsapódás elemzésére széles körű háttériradalom áll rendelkezésre, ugyanakkor a mai napig vannak megválaszolatlan kérdések. Az egyik ilyen nyitott kérdéskör az ütközések során lezajló folyamatok átfogó megértése, ami az összetett numerikus modellek fejlődésével sem veszít fontosságából. A növekedő számítógépi kapacitás miatt egyre összetettebb vizsgálatokra van lehetőség, amelyek az ütközés egyes részfolyamatainak (szerkezeti válasz, beton anyagi viselkedése, robbanás, tűz, stb.) vagy ezek kombinációjának elemzését célozzák. Az ilyen vizsgálati technikák hatékonyak, ugyanakkor nagyszámú paramétert tartalmaznak, ami növelheti az eredmények bizonytalanságát. Az egyes paraméterek szerepe, fontossága, illetve a paraméterek közti kapcsolat tisztázatlan lehet. A doktori disszertációmban az ütközés szempontjából lényeges paraméterek megtalálása, hatásuk elemzése a célom, mellyel az ütközési jelenségek jobb általános megértését segítem elő.

1.2. Repülőgép-becsapódás hatásai

Repülőgép-becsapódás többféle károsodáshoz vezethet. A Nemzetközi Atomenergia-ügynökség biztonsági előírása (IAEA, 2003) alapján globális és lokális elsődleges hatások, rezgések, másodlagos hatások (tűz, robbanás, stb.) vizsgálata szükséges. A globális hatások a teljes szerkezet válaszát jelentik (összeomlás, felborulás, túlzott mértékű deformációk), míg a lokális hatások (penetráció, perforáció, ütközés felőli és védett oldali mállás (varasodás), stb.) az ütközési zóna környezetében jelentkeznek (1. ábra). A disszertációban globális és lokális elsődleges hatásokkal foglalkoztam.

A repülőgép vagy annak részei által okozott károk nagymértékben függenek a célszerkezet és a repülőgép (lövedék) merevségi viszonyaitól. Nagy vastagságú vasbeton falnak ütköző géptörzs deformálódó (puha) lövedéknek tekinthető, ami globális hatásokat okoz (Sugano és társai, 1993-1), míg a leszakadó hajtómű nem deformálódó (kemény) lövedékként vizsgálható, ami befúródik a szerkezetbe, illetve perforációt okoz (Sugano és társai, 1993-2,3). A globális és lokális hatásokat a szakirodalomban elkülönítve vizsgálják, így a disszertációban is külön tárgyalom őket.



1. ábra: Lövedék ütközésének lokális hatásai: (a) penetráció, (b) kúpos repedés, (c) mállás, (d) repedések, (e) varasodás (védett oldali mállás), (f) perforáció, valamint globális hatása (g) (Li és társai, 2005)

A globális szerkezeti válasz elemzésére a Nukleáris Energia Intézet (NEI, 2011) két módszert javasol: az ütközéskor a célszerkezetre ható erőt meghatározzuk, majd időfüggő teherként egy független célszerkezet-modellen működtetjük (időtörténeti vizsgálat - force time-history analysis) vagy a lövedéket és a célszerkezetet is tartalmazó kapcsolt modellt készítünk (missile-target interaction analysis).

Az első vizsgálati módszerben a teher—idő (reakcióerő—idő) függvényt különféle modellek segítségével lehet meghatározni, melyek általában a fal síkjára normális irányú ütközést és merev célszerkezetet feltételeznek. Az ilyen modellek közül a legelterjedtebb a Riera-modell (Riera, 1968), aminek segítségével merev-tökéletesen képlékeny lövedék normál irányú ütközésekor a tökéletesen merev falra ható reakcióerő határozható meg. Széleskörű alkalmazása miatt elemzéseimben a Riera-modellből indulok ki, ennek eredményeit vetem össze végeselemes modellek eredményeivel.

A lokális hatások vizsgálatakor a legfontosabb mennyiségek, melyekkel az ütközés jellemezhető, a penetrációs mélység, illetve a perforációs-, és varasodási határvastagság. A penetrációs mélység az a távolság, ameddig a lövedék orra a végtelen vastagnak tekinthető célszerkezetbe befúródik. A perforációs- és varasodási határvastagságok pedig a perforáció és védett oldali

mállás elkerüléséhez szükséges minimális falvastagságokat jelentik. Ezeket a jellemzőket általában félempirikus képletek segítségével számítják (Kennedy, 1976; Teland, 1998; Li és társai, 2005; és Murthy és társai, 2010).

1.3. Célkitűzések

A disszertáció elsődleges célja olyan elemzések végrehajtása, melyek hozzájárulnak a nagy merevségű szerkezetbe történő repülőgép-bechapódáskor lejátszódó folyamatok jobb megértéséhez. Kitérek mind puha ütközések globális hatásának, mind kemény ütközések lokális hatásának vizsgálatára. Elemzem a Riera-modellben, illetve különböző végeselemes modellekben megjelenő paraméterek és paraméterkombinációk szerepét és fontosságát. A vizsgálatokkal az alábbi kérdések megválaszolását célozom meg:

Puha ütközések globális hatásaival kapcsolatos kérdések:

1. Mely paraméterek, illetve paraméterkombinációk határozzák meg az ütközési folyamatot, illetve az ütközés kimenetelét a Riera-modell segítségével vizsgált puha ütközés esetén?
2. Vajon a Riera-modellben minden esetben konzervatív a célszerkezetet tökéletesen me-revnek tekinteni?
3. Füg-g-e az egyes paraméterkombinációk szerepe és fontossága az alkalmazott modelltől?
4. Milyen paramétertartományokon ad a Riera-modell és az alkalmazott végeselemes model azonos eredményt?
5. Milyen szerepe van a valós repülőgép-paramétereknek és geometriának (orr-, és farokrész, hajtóművek, szárnyak) az ütközési folyamat szempontjából?

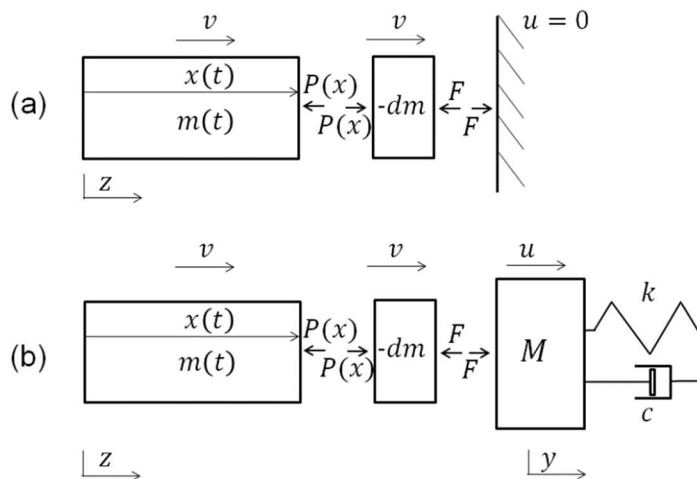
Kemény ütközések lokális hatásaival kapcsolatos kérdések:

6. Hogyan befolyásolják az egyes paraméterek és paraméterkombinációk a lokális károsodásokat (penetrációt, perforációt), amelyek kemény lövedékek vastag beton falba történő ütközésekor keletkeznek?

2. A Riera-modell paramétervizsgálata

A dolgozat első felében célo-m a repülőgép-bechapódás globális hatásait döntően befolyásoló paraméterek meghatározása volt. Ennek érdekében először a legegyszerűbb esetet, homogén repülőgéptörzset (körhenger alakú lövedéket) vizsgáltam a Riera-modell alapfeltevéseit követve (Riera, 1968).

A Riera-modellben a repülőt merev-tökéletesen képlékeny anyagú deformálódó lövedékként modellezzük, ami a felület síkjára merőlegesen ütközik egy tökéletesen merev célszerkezetnek (2.(a) ábra). Szintén alapfeltevés, hogy a lövedéknek csak a célszerkezet melletti keresztmetszetében történik törés, ennek megfelelően a gép az ütközés kezdete utáni t időpillanatban két részből áll: egy $x(t)$ hosszúságú, $m(t)$ tömegű ép részből és egy végtelen kicsi $(-dm) > 0$ tömegű részből, ami az előző időpillanatban tört le (2.(a) ábra). A meghatározandó $F(t)$ reakcióerő a fal és a letörő rész között hat, míg az ép és a letörő rész között a $P(x)$ törőerő működik, ami az aktuálisan törő keresztmetszet jellemzőitől függ.



2. ábra (a) Eredeti és (b) rugalmas Riera-model

A modellt Wolf (1978) egy szabadságfokú rezgőrendszerrel egészítette ki (2.(b) ábra), így a célszerkezet elmozdulásainak a reakcióerőre gyakorolt hatása is vizsgálható. A rugalmas célszerkezet (modális) tömege M , a rugóállandó k , a sebességgel arányos csillapítás együtthatója c .

A Riera-modellben felírhatjuk a $P(x)$ miatt lassuló ép rész mozgásegyenletét a $(-dm)$ tömeg letörése előtt és után, illetve az impulzusról a $(-dm)$ tömegre, ami a rá ható $P(x)$ és $F(t)$ erők hatására a célszerkezet sebességére lassul. Ezalatt a célszerkezet egy szabadságfokú, $F(t)$ erővel gerjesztett rezgőrendszerként viselkedik. Az egyenletek felírásával, átalakításával a gép tömegeloszlásának és törőterhének ismeretében az $x(t)$ törési folyamat és az $F(t)$ reakcióerő numerikusan számítható.

A törési folyamatot és a reakcióerőt befolyásoló legfontosabb paraméterkombinációk meghatározásához a Riera-modell alapegyenleteit dimenziótlan alakra írtam át. A legegyszerűbb, homogén repülőgéptörzset (körhenger alakú lövedéket) és merev célszerkezetet tartalmazó esetben a törési folyamat leírására analitikus megoldást adtam, amiben a törés csak egy újonnan bevezetett dimenziótlan paraméter, a *károsodási potenciál* függvénye.

A D károsodási potenciál a lövedék kezdeti mozgási energiájának és a töréshez szükséges munkának a hányadosa:

$$D = \frac{\frac{1}{2} m_0 v_0^2}{L P_0}, \quad (1)$$

ahol m_0 , v_0 , L , P_0 a lövedék kezdeti tömege, kezdősebessége, teljes eredeti hossza és törőterhének karakterisztikus értéke.

Homogén repülőgéptörzs és rugalmas célszerkezet esetén szintén megállapíthatjuk, hogy az ütközési folyamat döntően a károsodási potenciáltól függ, sem a repülőgép és a célszerkezet tömegének aránya, sem a célszerkezetnek a repülőgép törőterhéhez viszonyított merevsége nem befolyásolja azt lényegesen. Ugyanakkor a reakcióerő maximális értéke függ a célszerkezet jellemzőitől, és ez a maximális érték magasabb is lehet, mint amit merev célszerkezet feltételezésével kaphatunk. Ez azt jelenti, hogy merev célszerkezet feltételezése nem mindig konzervatív. A maximális reakcióerőt és maximális célszerkezet-elmozdulást eredményező paraméterkombinációkat szintén meghatároztam. A Riera-modell segítségével végzett analitikus és numerikus elemzések az alábbi tézisekhez vezettek:

1. tézis A Riera-modell dimenziótlanított változatára alapozva analitikus megoldást adtam homogén repülőgéptörzs (körhenger alakú lövedék) merev céltárgyba történő ütközésekor az ütközés lefolyásának és a fellépő reakcióerőnek a leírására.

(Laczák és Károlyi, 2017-1) alapján

2. tézis A Riera-modell alapján szisztematikus paramétervizsgálatot hajtottam végre homogén repülőgéptörzs (körhenger alakú lövedék) merev, illetve egy szabadságfokú rugalmas célszerkezetbe történő ütközése esetén. A vizsgálat alapján az ütközési folyamatot egyetlen paraméterkombináció, a károsodási potenciál határozza meg, ami a lövedék kezdeti mozgási energiájának és az összetöréséhez szükséges munkának a hányadosa.

(Laczák és Károlyi, 2017-1) alapján

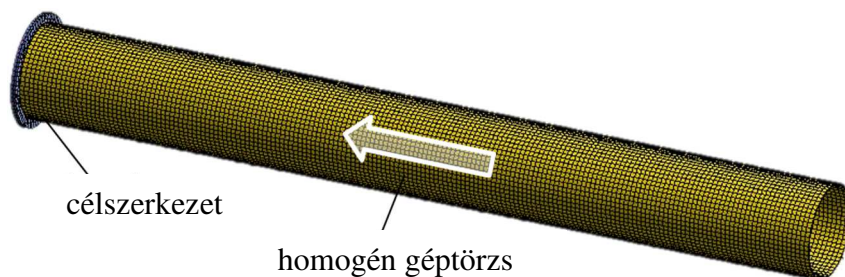
3. tézis Az egy szabadságfokú rugalmas célszerkezettel kibővített Riera-modellben a célszerkezet rugalmassága befolyásolja a célszerkezetre ható reakcióerő maximális értékét, ami nagyobb lehet, mint a tökéletesen merev célszerkezet esetén kapott reakcióerő. Ez igazolja, hogy tökéletesen merev célszerkezet feltételezése a Riera-modellben nem mindig közelít a biztonság javára.

(Laczák és Károlyi, 2015; Laczák és Károlyi, 2017-1) alapján

Az 1. tézis fontossága az, hogy a meghatározott analitikus megoldás alkalmazható numerikus modellek validálásához is. A 2. tézis az általam definiált károsodási potenciált tartalmazza, mely döntő szereppel bír homogén lövedékek Riera-moddal történő elemzésekor. A továbbiakban látható lesz, hogy a károsodási potenciál nemcsak a Riera-modell és nemcsak homogén lövedékek esetén lényeges paraméter. A 3. tézis felhívja a figyelmet arra, hogy a reakcióerő meghatározásakor a merev célszerkezet gyakorlatban is alkalmazott feltételezése nem minden esetben konzervatív, így nem alkalmazható automatikusan.

3. A károsodási potenciál szerepe puha ütközés végesselemes modelljében

Az eddigi vizsgálatokban a széles körben elterjedt Riera-modell segítségével elemeztem homogén repülőgéptörzs puha ütközését és az ütközést befolyásoló paramétereket. Következő lépésként olyan modelleket alkalmaztam, melyek több paramétert tartalmaznak, mint a Riera-modell, és megvizsgáltam, hogy itt is megmarad-e a károsodási potenciál domináns szerepe. A vizsgált modell egy üreges körhenger (homogén repülőgéptörzs) végesselemes modellje (3. ábra3. ábra), ami ANSYS Workbench Explicit Dynamics környezetben készült. A géptörzs lineárisan rugalmas-kvázi tökéletesen képlékeny anyagú, melyben a tönkremenetelt a határösszenyomódás elérése jelenti. A vizsgált géptörzs geometriáját és paramétereinek alapértékeit úgy vettem fel, hogy illeszkedjenek a szakirodalomban sokszor vizsgált kisméretű vadászgép, például Phantom F4 jellemzőihez. A homogén géptörzs ütközését merev és lineárisan rugalmas célszerkezetek esetén is vizsgáltam.



3. ábra: Homogén repülőgéptörzs és merev célszerkezet végesselemes modellje

Az alkalmazott végesselemes modell lényegesen több paramétert tartalmazott, mint a Riera-modell, de kevesebbet, mint egy repülőgép valós léptékű modellje. Az ilyen módon csökkentett számú paraméter esetén lehetőség volt annak vizsgálatára, hogy mely paraméterek és kombinációik befolyásolják lényegesen az ütközési folyamatot. Megállapítottam, hogy a károsodási potenciál ebben az esetben is döntő jelentőséggel bír, míg a többi paraméter hatása másodlagos volt. Szintén megállapítottam, hogy ha a paramétereket úgy változtatjuk, hogy a károsodási

potenciál értéke változatlan, akkor az ütközési folyamat lefolyása változatlan marad. A vizsgálatok alapján a következő tézisek fogalmazhatók meg:

4. tézis *Homogén repülőgéptörzs merev vagy lineárisan rugalmas célszerkezetbe történő becsapódása esetén széles paramétertartományon összehasonlítottam a Riera-modell és egy kvázi merev-tökéletesen képlékeny anyagmodellt alkalmazó végeselemes modell eredményeit. Az eredmények alapján a vizsgált paramétertartományon a károsodási potenciál a legfontosabb paraméter, ami meghatározza az ütközési folyamatot. Ez azt jelenti, hogy*

– ha a lövedék vagy a célszerkezet paraméterei úgy változnak, hogy a károsodási potenciál értéke változatlan marad, vagy

– ha csak a végeselemes modellben szereplő paraméterek változnak, akkor az ütközési folyamat jellegében változatlan marad.

(Laczák és Károlyi, 2017-2) alapján

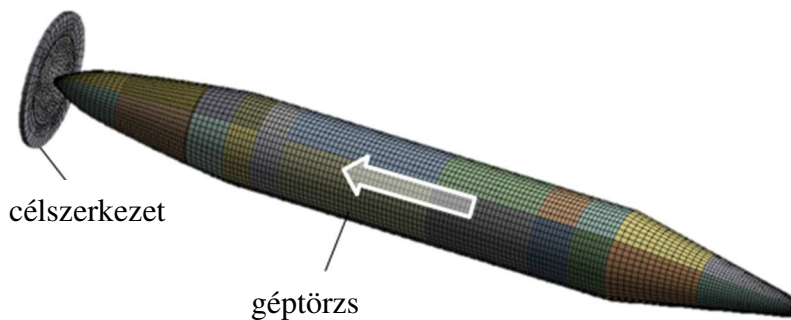
5. tézis *Homogén, kvázi merev-tökéletesen képlékeny repülőgéptörzs esetén a Riera-modell és a végeselemes modell eredményei közti eltérés függ a D károsodási potenciáltól. Ha $D < 2$, akkor kemény ütközés történik, a lokális hatások dominánsok, így az alkalmazott modellek kívül esnek a puha ütközésekre alkalmazható modellek tartományán. Ha D értéke 2 és 10 közé esik, akkor a végeselemes modellben a lassulás kis mértékű vagy elhanyagolható, míg a Riera-modellben intenzív lassulás tapasztalható, így nagy az eltérés a két modell segítségével számított reakcióerőben. Ha D nagy ($D > 10$), akkor a két modell közti eltérés lényegében független D -től. Ezen a tartományon mindkét modellben elhanyagolható a lassulás, így kvázi-hidrodinamikus ütközés alakul ki.*

(Laczák és Károlyi, 2017-2) alapján

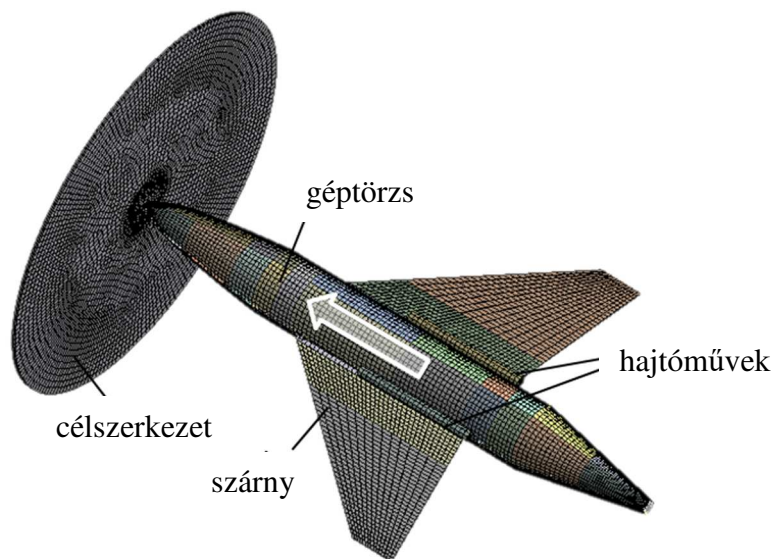
A 4. tézis szerint a károsodási potenciál döntő fontossággal bír nemcsak a Riera-, de az alkalmazott végeselemes modellben is. Az 5. tézis szerint a Riera- és végeselemes modellek közti eltérés a károsodási potenciál függvényében változik. A kritikus tartományban (ha D 2 és 10 közé esik), ahol az eredmények közti eltérés a legnagyobb, több modell párhuzamos alkalmazása és eredményeik összehasonlítása javasolt. Ebben a tartományban a Riera-modellben a lövedék intenzív lassulása tapasztalható, ami nem jelenik meg a végeselemes modellben. A károsodási potenciál értéke a modellek alkalmazhatóságát is jellemezi és az ütközések osztályozását is lehetővé teszi.

4. Valós repülőgép-jellemzők hatása

A homogén repülőgéptörzsek vizsgálatát követően a valós jellemzőket jobban közelítő Riera- és végeselemes modelleket két lépésben elemeztem. Először a homogén géptörzset orr- és farkrészrel, majd szárnyakkal és hajtóművekkel egészítettem ki (4. és 5. ábra). Ezzel együtt az eddigiekben döntő fontosságú károsodási potenciál fogalmát is alkalmaztam nem homogén lövedékek esetére úgy, hogy a törőteher hossz mentén súlyozott átlagos értékét alkalmaztam karakterisztikus értéként.



4. ábra: Orr- és farkrészt tartalmazó repülőgéptörzs végeselemes modellje



5. ábra: Szárnyat és hajtóművet is tartalmazó repülőgép végeselemes modellje

A vizsgálatok eredményei alapján a következő tézis fogalmazható meg:

6. tézis A Riera-modell és egy végeselemes modell segítségével paramétervizsgálatot hajtottam végre orr- és farkrészt, valamint szárnyakat és hajtóműveket tartalmazó egyszerűsített repülőgép-modellek esetén. Az eredmények alapján a károsodási potenciál orr- és farkrészt, valamint szárnyakat és hajtóműveket tartalmazó repülőgépmodellek esetén is meghatározza az ütközési folyamatot.

(Laczkák és Károlyi, 2014; Laczkák és Károlyi, 2017-2) alapján

A 6. tézis alapján a károsodási potenciál a valós repülőgépeket jobban közelítő modellek esetén is jól jellemezi az ütközési folyamatot. A Riera- és végeselemes modellek közti eltérés realiztikusabb gép jellemzők esetén is hasonlóan függ a károsodási potenciáltól, mint homogén géptörzsek esetén. Ennek megfelelően a károsodási potenciál általános esetben is alkalmas az ütközés jellemzésére, egyszerűsített számítások, illetve a szükséges modellezési szint választása esetén gyakorlatban is alkalmazható.

5. Kemény lövedékek lokális hatásai

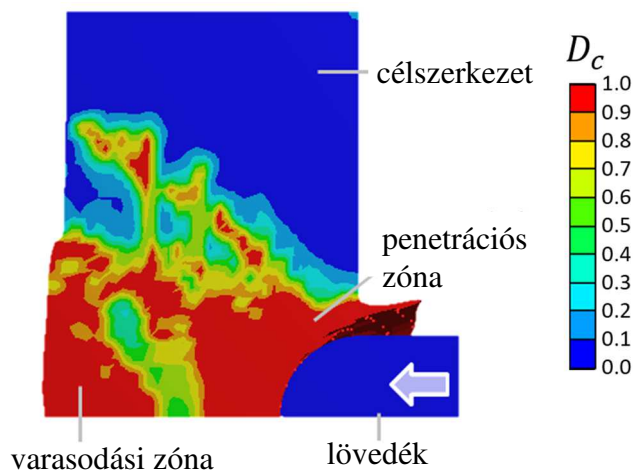
A disszertáció első részében puha ütközések globális hatásával, míg a második felében tökéletesen merev lövedékek becsapódásakor keletkező lokális hatásokkal foglalkoztam. Ilyen lövedékek keletkezhetnek repülőgép-becsapódáskor, de tornádó vagy üzemi baleset (pl. turbinatörés) során is. A disszertációban a szakirodalomban is alkalmazott félempirikus képletek és egy numerikus tesztsorozat segítségével vizsgáltam beton célszerkezet penetrációját, perforációját. Egy Sugano és társai által végrehajtott (Sugano és társai, 1993-2,3), jól dokumentált valós kísérletsorozatot alkalmaztam egy saját végeselemes modell kalibrációjához és validálásához. A modell ANSYS Workbench Explicit Dynamics környezetben készült és olyan beton anyagmodellt tartalmaz (Concrete 35 MPa), ami képes a penetráció és perforáció jellegű tönkremenetelt is követni (6. ábra). Numerikus tesztsorozatban vizsgáltam a különböző paraméterek (lövedék mérete, tömege, sebessége, beton szilárdsága) hatását, majd az eredmények alapján új formulákat határoztam meg a penetrációs mélység és perforációs határvastagság számításához. Az új képletekkel kapott eredmények jó egyezést mutatnak mind a numerikus tesztek, mind a valós kísérlet eredményeivel. Jól követik a kísérleti eredményekben megjelenő tendenciákat kis-, közepes- és nagyméretű lövedékek esetében is. A képletek egyszerűek és mértékegység-függetlenek, így gyakorlatban is alkalmazhatók. A formulákat egy heurisztikus elméleti modellel is alátámasztottam.

Megállapításaimat az alábbi tézisben foglaltam össze:

7. tézis Félgömb alakú orral rendelkező, kemény lövedékek beton célszerkezetbe történő ütközésének vizsgálatára kalibrált és validált végeselemes modellt készítettem. Numerikus kísérletsorozat segítségével új fél-empirikus összefüggést határoztam meg a penetrációs mélység és a perforációs határvastagság, illetve az ütközés paraméterei (lövedék mérete és tömege, ütközési

sebesség, beton szilárdsága) között. Az összefüggések alapján a penetrációs mélység a dimenziótlan ütközési tényező négyzetgyökével, míg a perforációs határvastagság a köbgyökével arányos.

(Laczák and Károlyi, 2016-2) alapján



6. ábra: Beton-célszerkezet károsodása a végeleemes modellben. A piros szín a teljesen tönkrement végelelemeket (a károsodási szint, $D_c=1$), míg a kék szín a teljesen ép elemeket ($D_c=0$) jelöli.

6. További kutatási irányok

A disszertációban repülőgépbecsapódás globális és lokális elsődleges hatásait külön vizsgáltam. Az ilyen jellegű elkülönített vizsgálat a szakirodalomban is gyakori, így a jövőbeli kutatási terveim is két fő irányt követnek.

Puha ütközések globális hatásainak vizsgálatához más numerikus technikák is rendelkezésre állnak (diszkrét elemes modellek, simított részecskekinémika, stb.), ezek alkalmazásával is tervezem a különböző paraméterek hatását elemezni. A modellekkel kapott eredmények elemzésével és összehasonlításával bővíteni lehet az egyes paraméterek és paraméterkombinációk hatásainak vizsgálatát. Ezen belül kiemelten vizsgálnám az eddigiekben dominánsnak bizonyuló károsodási potenciál hatását.

Kemény lövedékek lokális hatásainak tekintetében jövőbeli terveim az eddig nem vizsgált paraméterek elemzésére vonatkoznak. Az eddig is használt numerikus modellt következő lépésként vasalással egészítem majd ki, így feltehetően a védett oldali mállás (varasodás) vizsgálata is lehetővé válik. Szintén tervezem a betonösszetétel (adalékanyag típusa és szemmagyság, vízcement tényező, stb.) és a betontechnológiai döntések penetrációs mélységre és perforációs határvastagságra gyakorolt hatásának vizsgálatát. Az adalékanyag hatásának vizsgálatára egy kis

léptékű lőtéri kísérletsorozatra, illetve az eredménynek előzetes feldolgozására már sor került (Laczák, 2017-3).

Szintén jövőbeli céloom kvázi-kemény (pl. valós hajtómű merevségű), deformálódó lövedékek vizsgálata, illetve hosszú távon olyan összetett numerikus modellek alkalmazása, amelyek mind a lokális, mind a globális elsődleges hatások, mind egyes másodlagos hatások elemzésére alkalmasak.

Hivatkozások

Publikációk az értekezés témakörében

Laczák, L.E., 2013: Aircraft impact into rigid structure. Proceedings of the Second Conference of Junior Researchers in Civil Engineering. Budapest, Magyarország. 105-110.

Laczák, L.E., Gy. Károlyi, 2014: Parametric study for aircraft impact. Proceedings of SUSI2014: the XIII International Conference on Structures Under Shock and Impact. Southampton, United Kingdom. 87-93.

Laczák, L.E., Gy. Károlyi, 2015: Repülőgép nagy merevségű szerkezetbe történő ütközésének lényeges paraméterei. Proceedings of the XII. Magyar Mechanikai Konferencia. Miskolc, Hungary. Paper 332, 4 pages.

Laczák, L.E., Gy. Károlyi, 2016-1: Az atomerőműre történő repülőgéprázuhanás építőmérnöki aspektusai. *Építés és Építészettudomány* 44(1-2):13-24.

Laczák, L.E., Gy. Károlyi, 2016-2: Local Effects of Impact into Concrete Structure. *Periodyca Polytechnica Civil Engineering* 60:573-582.

Laczák, L.E., Gy. Károlyi, 2017-1: On the impact of a rigid-plastic missile into rigid or elastic target. *International Journal of Non-Linear Mechanics* 91:1-7.

Laczák, L.E., Gy. Károlyi, 2017-2: Parametric study of the force acting on a target during an aircraft impact. Proceedings of ENOC2017: the 9th European Nonlinear Dynamics Conference. Budapest, Hungary. Accepted.

Laczák L.E., 2017-3: Adalékanyag hatása beton kemény lövedékekkel szembeni ellenállására. Szakdolgozat, Betontechnológus szakirányú továbbképzési szak, BME Építőmérnöki Kar. Konzulensek: S. G. Nehme, Gy. Károlyi.

Az összefoglalásban szereplő publikációk

Ansys Workbench Help, 2015, Version: 15.0.0, SAS IP Inc.

DOE (U.S. Department of Energy), 2006: DOE Standard, DOE-STD-3014-2006. Accident analysis for aircraft crash into hazardous facilities. Washington DC 20585.

IAEA Safety Standard Series, 2003: *External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants*, Safety Guide No. NS-G-1.5, Vienna.

Kennedy, R. P., 1976: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. *Nuclear Engineering and Design*. 37:183-203.

Li, Q.M., S.R. Reid, H.M. Wen, A.R. Telford, 2005: Local impact effects of hard missiles on concrete targets.. *International Journal of Impact Engineering* 32:224-284.

Murthy, A. R. C., G. S. Palani, N.R. Iyer, 2010: Impact Analysis of Concrete Structural Components. *Defense Science Journal* 60:307-319.

NEI (Nuclear Energy Institute), 2011: Methodology for performing aircraft impact assessments for new plant designs. NEI 07–13 [Revision 8P], Washington DC.

Riera, J.D., 1968: On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces. *Nuclear Engineering and Design* 8:415-426.

Sugano, T., H. Tsubota, Y. Kasai, N. Koshika. S. Orui, W.A. von Riesemann, D.C. Bickel, M.B. Parks, 1993-1: Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force. *Nuclear Engineering and Design* 140:373-385.

Sugano, T., H. Tsubota, Y. Kasai, N. Koshika, H. Ohnuma, W.A. von Riesemann, D.C. Bickel, M.B. Parks, 1993-2: 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.

Sugano, T., H. Tsubota, Y. Kasai, N. Koshika, H. Ohnuma, W.A. von Riesemann, D.C. Bickel, M.B. Parks, 1993-3: Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 2. Evaluation of test results. *Nuclear Engineering and Design* 140:407-423.

Teland, J. A., 1998: A review of empirical equations for missile impact effects on concrete. Report no. FFI/RAPPORT-97/05856, Norwegian Defence Research. Establishment, Kjeller.

Wolf, J.P., K.M. Bucher, P.E. Skrikerud, 1978: Response of equipment to aircraft impact. *Nuclear Engineering and Design* 47: 169-193.