

EJTÉSI TESZT MODELLEZÉSE A TERVEZÉS FÁZISÁBAN

DROP TEST MODELING IN THE PERIOD OF DESIGNING

*Antal Dániel, doktorandusz, Miskolci Egyetem Robert Bosch Mechatronikai Tanszék
Szabó Tamás egyetemi docens, Ph.D., Miskolci Egyetem Robert Bosch Mechatronikai Tanszék
Szilágyi Attila, egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke*

ABSTRACT

This paper deals with the simplified modeling of drop tests. Two methods are investigated, the first one is based on strain energy computations, assuming linear and non-linear constitutive models. The second method is using the so called shock analysis with velocity spectrum. Numerical results are compared.

1. BEVEZETÉS

Egy fejlesztendő mechatronikai terméknek számos tervezési szempontnak kell megfelelnie. Egyik elvárás, hogy bizonyos magasságról leejtve ne szenvedjen maradandó károsodást a termék. Ütközéses tönkremenetelt modellező szoftvereket (pl.: Nastran, Abaqus, stb.) „crash analysis”-el alkalmaznak az autóiparban autók vizsgálatára. A vizsgálatok legmunka-igényesebb része a szigorú előírásoknak megfelelő végeelem háló generálása. Ennek a költsége és ideje egy termék kifejlesztésénél többnyire nem áll rendelkezésre.

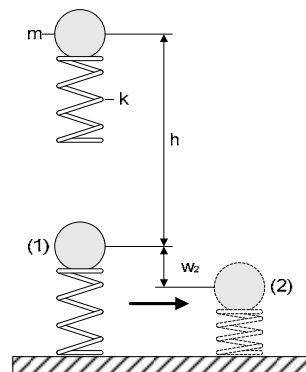
Jelen cikk célja, hogy különböző egyszerűsített modellezési módokat vizsgáljon meg, amelyek viszonylag rövid idő alatt kivitelezhetők, és könnyen végrehajthatók már a tervezés fázisában.

Ebben a cikkben kétféle modell vizsgálatát mutatjuk be. Az első az energia megmaradás elvére épül, vagyis feltételezi, hogy a helyzeti energia először mozgási energiává, majd az ütközés alatt alakváltozási energiává alakul. A második modell a spektrális elméletre épül, ahol az ütközési sebességspektrum a bemeneti paraméter.

2. ÜTKÖZÉS VIZSGÁLATA AZ ALAKVÁLTOZÁSI ENERGIA ALAPJÁN

2.1. A módszer elméleti alapja

Az 1. ábra a leejtett termék centrikus ütközésének [1] egy szabadsági fokú modelljét mutatja be, ahol w_2 a maximális rugó összenyomódás. A vizsgált terméket a felütközés környezetében rugalmas képlékenynek tekintjük, a beton padlózatot merevnek.



1. ábra. A centrikusan ütköző szerszám egy szabadságfokú rugalmas modellje

A modellezésnél felhasználjuk a szabadesés és a nemlineáris karakterisztikájú rugóra vonatkozó összefüggéseket. Eltekintünk minden energia disszipációtól, pl.: légellenállás, hanghatások, stb. A helyzeti energia és a kinetikai energia megegyezik: $mgh = \frac{1}{2}mv^2$, ahol m a szerszám

tömege, g a nehézségi gyorsulás, h az ejtési magasság, v az ütközési sebesség. Az elméleti ütközési sebesség: $v_0 = \sqrt{2gh}$. Az energia tétel alapján az alábbi egyenletek adódnak:

$$E_2 - E_1 = W_{12} \quad E_2 = 0 \quad (1)$$

$$E_1 = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (2)$$

$$W_{12} = \int_0^{w_2} F_k(z) dz \quad (3)$$

$$-E_1 = \int_0^{w_2} F_k(z) dz \quad (4)$$

ahol E_1 , E_2 a kinetikai energia, W_{12} a külső erők munkája, amely a rugalmas-képlékeny rugóban halmozódik fel, $F_k(z)$ a rugalmas képlékeny rugóban ébredő erő.

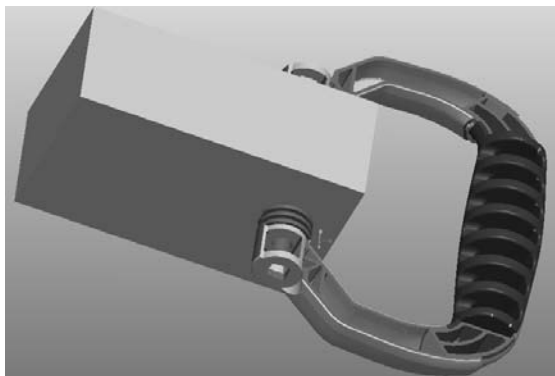
A numerikus számításokat az alábbi módon hajthatjuk végre: a szerszám 3 dimenziós modellének végeelemes hálózása után fokozatosan növekvő terhelést írunk elő diszkrét felütközési felületeken. Az erő maximális értéke

kissé haladja meg az ütközés során fellépő tényleges csúcserőértéket.

A terheléstörténet során az lépésenként meghatározzuk a szerkezet alakváltozási és feszültségi állapotát. Az alkalmazott érintkezési terhelő erő és a hozzátartozó elmozdulási érték alapján felvesszük a $F_k(z)$ görbét. A görbe alatti terület szolgáltatja a W_{12} külső erők munkáját. Azt a terhelési állapotot keressük, ahol a kinetikai energia és a W_{12} megegyezik, és a fellépő feszültségek alapján tönkremeneteli megállapítás tehető.

2.2. Ejtési feladat szimmetrikus felütközésnél

A 2. ábra egy képzeletbeli terméket szemléltet a műanyag fogantyújával. Az ütközés a termék szimmetria síkjában a fogantyú homlok részén következik be.



2. ábra. A helyettesítő geometriai modell

A rugalmas képlékeny modellen az alábbi kiindulási paramétereket alkalmaztuk: termék tömege $m=1,9 \text{ kg}$, ejtés magassága $h=1 \text{ m}$, rugalmassági modulusz $E=8,5 \text{ GPa}$, Poisson-tényező $\nu=0,4$, szakítószilárdság $R_m=135 \text{ MPa}$, folyáshatára $R_e=100 \text{ MPa}$, képlékeny meredekség $\eta_{pl}=500 \text{ MPa}$, sűrűsége $\rho=1370 \text{ kg/m}^3$.

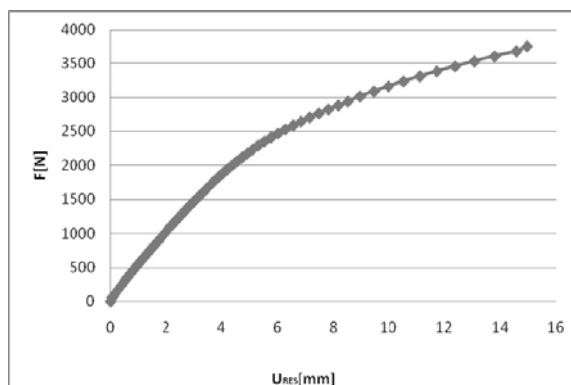
A terhelés fokozatos növelésével a maximálisan 3750 N nagyságú terhelést 61 lépésben értük el. A számított értékek alapján megrajzolható elmozdulás-erő diagramot a

3. ábra szemlélteti, amelyből jól látható a szerkezet nem lineáris viselkedése. A helyzeti energia értéke:

$$m g h = 1,9 \cdot 9,81 \cdot 1 = 18,639 \text{ Nm}.$$

A helyzeti energiával megegyező alakváltozási energia az 52. és 53. terhelés között mutatkozott meg. Az elmozdulás maximális értéke a felüt-

közés helyén látható. A felütközés érintkezési tartományában horpadás figyelhető meg.



3. ábra. Az erő-elmozdulás diagram

A fogantyú viszonylag kis tartományain kapunk $R_m=135 \text{ MPa}$ szakítószilárdságot meghaladó értéket, pl.: az erőhatások, valamint a fogantyú íves átmenetei közelében. A szakítószilárdságot meghaladó feszültségű helyeken valószínűsíthető tönkremenetel.

3. ÜTKÖZÉS VIZSGÁLATA SEBESSÉG SPEKTRUM ALAPJÁN

3.1. Az ejtésvizsgálat szimulációs elve

Feltételezzük, hogy a talajt érés pillanatában a termék talajjal érintkező pontjának sebessége T végtelen kicsiny idő alatt válik nullává, és az ütközés tökéletesen rugalmas. Szimuláció során a T idő alatt lezajló energiaátalakulási folyamatot követjük nyomon, és meghatározzuk az ütközés hatására felépülő feszültségmezőt.

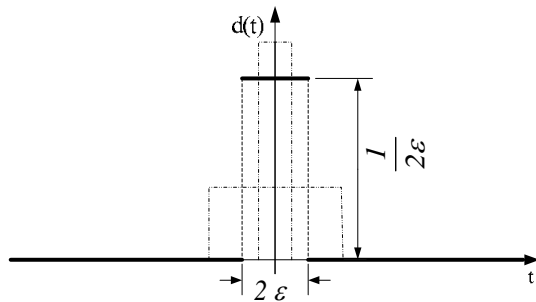
Ugyanerre az alakváltozási állapotra jutunk, ha a talajhoz – egy nagyon kis felületen keresztül – rögzített test a talaj felől, az esési iránnyal ellentétes irányú, impulzusszerű sebességgerjesztést kap. Szimulációs vizsgálatainknál az utóbbi, az ejtési jelenséggel ellentétes irányú, impulzusszerű sebességgerjesztést alkalmaztuk [1].

3.2. Az impulzusszerű sebességgerjesztés értelmezése

Fizikai, mechanikai rendszerek impulzusszerű gerjesztés vizsgálatára az ún. Dirac-féle impulzusfüggvényt hívják segítségül a számítás menetének megkönnyítésére. Lényeges tulajdonsága e függvénynek, hogy egységgerjesztés, és ezért igaz rá az $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$ összefüggés. Ennek megfelelően a Dirac-függvény képzése a

$$d(t) = \begin{cases} \frac{1}{2\varepsilon}, & \text{ha } -\frac{\varepsilon}{2} \leq t \leq \frac{\varepsilon}{2} \\ 0, & \text{egyébként,} \end{cases} \quad (5)$$

illetve a $\delta(t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} [d(t)]$ összefüggések alapján a $d(t)$ függvényből kiindulva is elvégezhető (4. ábra).



4. ábra. A Dirac-féle impulzus függvény származtatása

A rendelkezésünkre álló végeselemes szoftver a numerikus számítást nem az (5) függvényekkel megadott kifejezéssel végzi az időtartományon, hanem azt a $\delta(t)$ Fourier-integrálját felhasználva, frekvenciatartományon végzi el, és ezt követően tér vissza az időtartományra.

Egy $f(t)$ függvény Fourier-integrálja a

$$\mathfrak{F}[f(t)] = \mathfrak{F}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad \text{kifejezéssel}$$

számítható, ahol $j = \sqrt{-1}$ a képzetes egység.

Ezzel kapcsolatban $f(t)$ -re vonatkozik egy szükséges feltétel: létezzen $f(t)$ abszolút integrálja, azaz a $I = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt$ improprius integ-

rál legyen véges. Ez a feltétel $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$

alapján a Dirac-függvényre teljesül, így $\mathfrak{F}[\delta(t)]$ létezik. Az alábbiakban ezt ki is számítjuk, mert a Dirac-függvény Fourier-integrálját kell a numerikus számításához megadni. A 4. ábra alapján az értelmezési tartomány a

$$\mathfrak{F}[\delta(t)] = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} \frac{1}{2\varepsilon} e^{-j\omega t} dt \quad (6)$$

összefüggéssel írható fel. A (6) integrálását elvégezve

$$\mathfrak{F}[\delta(t)] = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{2\varepsilon} \left(-\frac{1}{j\omega} e^{-j\omega t} \right) \Bigg|_{-\varepsilon}^{\varepsilon} \quad (7)$$

adódik. Behelyettesítve az integrálási tartomány végpontjait a Fourier-integrálba

$$\mathfrak{F}[\delta(t)] = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[-\frac{1}{2j\omega\varepsilon} (e^{-j\omega\varepsilon} - e^{j\omega\varepsilon}) \right] \quad (8)$$

adódik. Alkalmazzuk az $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$ Euler-féle összefüggést, így (8)-ra kapjuk, hogy

$$\begin{aligned} \mathfrak{F}[\delta(t)] &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[-\frac{1}{2j\omega\varepsilon} (-2j \sin(\omega\varepsilon)) \right] = \\ &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[\frac{\sin(\omega\varepsilon)}{\omega\varepsilon} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Ismert, hogy $\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin x}{x} \right) = 1$, így (9) -re kapjuk, hogy

$$\mathfrak{F}[\delta(t)] = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[\frac{\sin(\omega\varepsilon)}{\omega\varepsilon} \right] = 1. \quad (10)$$

Látható, hogy a Dirac-féle gerjesztés Fourier-integrálja, amely egyben a gerjesztés spektruma is, egy egységnyi ordináta értéknél futó vízszintes egyenes. Ez azt jelenti, hogy egy egységnyi impulzusgerjesztés minden egyes frekvenciát egységnyi mértékben tartalmaz. Az imént kapott eredmény elmozdulás-, sebesség- és gyorsulásimpulzus gerjesztésnél egyaránt érvényes.

Mivel egy tömegpontot h magasságból leejtve, a közegellenállástól, illetve minden egyéb csillapítástól eltekintve $v_0 = \sqrt{2gh}$ sebességgel ér talajt, az alkalmazott gerjesztés Fourier-integrálja, azaz a spektrum

$$\mathfrak{F}[\delta_v(t)] = v_0. \quad (11)$$

Szimulációnál a sebességimpulzust a (11)-nek megfelelően definiáljuk.

3.3. Ejtési feladat megoldása spektrális módszerrel

A 2. ábrán vázolt szimbolikus terméket a 2.2. pontban megadott paraméterekkel írjuk le. Az ütközést kényszerek segítségével szimmetrikus feltételek között modellezzük.

A kényszerek elsődleges célja a merevtestszerű elmozdulás megakadályozása, másrészt irányított alakváltozás előidézése, amely a valóságot jól közelíti. Ennek segítségével jelentős számítási idő takarítható meg. Feltesszük továbbá, hogy a test ütközési pontja ezen a síkon helyezkedik el, és az ütközés következtében kialakuló elmozdulások az iménti síkra ugyancsak szimmetrikusan és centrikusan történnek.

A feltételezett ütközési pont környezetében egy, a teljes modell méretéhez képest igen kicsi felületet hozunk létre, amelyen keresztül a modellt rögzítjük a képzeletbeli talajhoz, és amelyen keresztül az ütközést szimuláló impulzusszerű sebességgerjesztést a testre gyakoroljuk. Az analízis típusa: „dynamic-shock”.

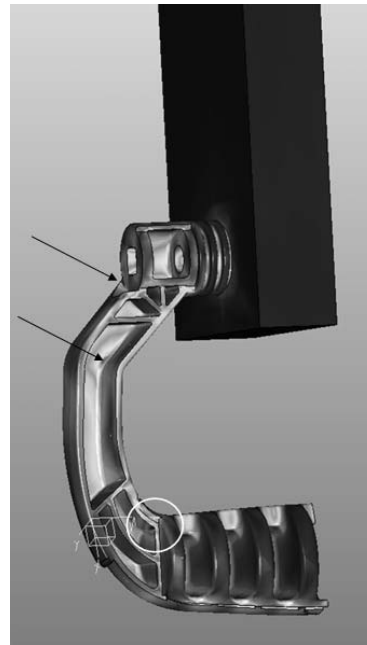
A sebességspektrum koordinátaértékét a

$$h = 1 \text{ m}, \quad g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, \quad \text{figyelembe vételével}$$

$$v_0 = \sqrt{2gh} = \sqrt{19,62 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} \approx 4,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{értéket kapunk.}$$

A program futtatás eredményeként ütközéskor következtében a fogantyúban ébredő redukált feszültségmezőt az 5. ábra mutatja. Körrel jelöljük azt a zónát, amelynek sérülése legvalószínűbb az ütközésnél. Emellett két zónát is megjelölünk nyilakkal, amelyekben ébredő feszültségcsúcsok csak kicsivel alacsonyabbak a maximális, körrel jelölt értéknél.

A körrel jelölt zónában $\sigma_{red_{max}} = 164 \text{ MPa}$, a nyilakkal jelölt helyeken ennél az értéknél valamivel kisebb, $\approx 130 - 140 \text{ MPa}$ értékű redukált feszültségek ébrednek. Az adatlap szerint a PA66+30GF jelű műanyag szakítószilárdsága $R_m = 135 \text{ MPa}$, így a körrel jelzett zónában ejtéskor nagy valószínűséggel bekövetkezik a törés.



5. ábra. A redukált feszültségmező eloszlása

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A cikk kétféle módszert vizsgál ejtésteszt modellezésére. Az egyik módszer energia megfontolásokon alapul, és rugalmas képlékeny anyagmodell tételével fel. A másik az úgynevezett „shock analysis” módszerét alkalmazza, sebességspektrum előírásával. A két módszer alapján elvégzett vizsgálatok a tönkremenetelt közel azonos helyeken valószínűsítik.

5. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A kutató munka a TÁMOP-4.2.1B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

6. IRODALOM

- [1] WILSON L. E. : Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, 1995.
- [2] BÉDA GY.-BEZÁK A. : Kinematika és Dinamika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.