



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Hidak és Szerkezetek Tanszék

A belebegés hatása hidak merevítőtartójának elmozdulásaira turbulens szélben

PhD értekezés téziszfüzete

Hunyadi Mátyás
okl. építőmérnök
programozó matematikus

Tudományos vezető:
Dr. Hegedűs István
Prof. Emeritus
a műszaki tudomány doktora

Budapest, 2012.

1. Bevezetés

1.1. Szélmérnöki alapfogalmak

A dolgozat témájának tárgyalását alapvetően az építőmérnöki ismeretanyagra alapozom, ezért a kutatásom célkitűzésének megfogalmazása megkívánja néhány szélmérnöki alapfogalom áttekintését.

A szélmérnöki tudományterület hivatott a légköri határréteg szele és az ember, illetve az épített környezet kölcsönhatását tárgyalni. A szakterület felöleli a meteorológiai, az áramlástani és a szerkezetdinamikai ismereteket. Alkalmazási területe kiterjed a legváltozatosabb építmények szerkezeti vizsgálatára (magas épületek, hidak, tornyok), de szorosan kapcsolódik az energiaiparághoz is (szélturbinák).

Szélnek nevezzük a Föld légkörének mozgását, a szél szerkezeteket érő hatásait aerodinamikai hatásoknak, a szerkezeteket terhelő erőket *aerodinamikai erőeknek*, illetve *széltehernek*. A szél örvényessége, azaz turbulenciája következtében fellépő szélterheket Davenport (1961, 1967) statisztikai eszközökkel felbontotta átlagértékre (*statikus szélteher*) és az akörül ingadozó *széllökés-teherre*. Hasonlóan választható szét a szerkezeti válasz is.

Az *aeroelaszticitás* az aerodinamikai erők és a szerkezeti hajlékonyság kölcsönhatása, amely a szerkezet túlzott mértékű elmozdulásaihoz és tönkremeneteléhez vezethet. A hidak merevítőtartójának periodikus *aerodinamikai stabilitásvesztési* formáját nevezzük *belebegésnek*, az ezt létrehozó erőket pedig *öngerjesztett erőeknek*. Hidak belebegési instabilitásával a Tacoma Narrows híd 1940-es leszakadása óta foglalkoznak. Selberg (1961) a belebegést a keresztmetszet meghatározott mértékű elcsavarodásához kötötte, ő és Rocard (1963) – egymástól függetlenül – közelítő képletet adtak a jellemzően torziós ágú belebegés kritikus *belebegési sebességére*. Klöppel és Thiele (1967) az aerodinamikai instabilitási jelenség kezelését egy komplex sajátérték-feladatra vezette vissza. A repüléstanban Theodorsen (1935) analitikusan levezette kétszabadságfokú (emelkedés és elcsavarodás) síkklap keresztmetszetre az öngerjesztett erők lineáris, frekvenciafüggő kifejezését, amelyet Scanlan és Tomko (1971) fogalmazott át hidak merevítőtartójára a szélszatornában mérendő belebegési *derivátívumok* bevezetésével (1. ábra):

$$L_{se}(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left(K H_1^* \frac{\dot{h}}{U} + K H_2^* \frac{\dot{\alpha} B}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right) \quad (1a)$$

$$M_{se}(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left(K A_1^* \frac{\dot{h}}{U} + K A_2^* \frac{\dot{\alpha} B}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right), \quad (1b)$$

ahol L és M az öngerjesztett emelőerő és csavarónyomaték, h és α a B szélességű keresztmetszet emelkedése és elcsavarodása, U a lamináris szélesebesség, $K = \frac{2\pi}{U_{red}} = \frac{\omega B}{U}$ a redukált körfrekvencia, U_{red} a redukált sebesség, ω a mozgás

körfrekvenciája, ρ a levegő térfogatsúlya, t az idő, H_i^* és A_i^* ($i = 1, \dots, 4$) a derivatívumok és $(\dot{})$ az idő szerinti derivált. Chen X., Matsumoto, et al. (2000) a derivatívumok racionális függvényes közelítésével a szélleőkés-terhek és az öngerjesztett erők együttes figyelembevételére alkalmas frekvenciafüggetlen eljárást adtak.

Az öngerjesztett erők turbulens áramlásban való figyelembevétele fontos áramvonalas keresztmetszetek stabilitásvizsgálatánál.

1.2. A kutatás célkitűzése

Tanszéki szakértés keretében elvégzett szélcsatorna-kísérlet és aerodinamikai instabilitás vizsgálat felhívta a figyelmet a mérési hibák kihatásának mértékére. Ennek feltárása lett a kutatásaim első célja, amely során egy olyan modellt dolgoztam ki, amellyel a keresztmetszet-modell geometriai tökéletlenségeinek a derivatívumokra és a belebegési sebességre kifejtett hibája számítható, illetve mérsékelhető.

Ezzel párhuzamosan jelentkezett a gyakorlati igény az öngerjesztett erők a szélleőkés-terhek okozta szerkezeti elmozdulásokra kifejtett többlethatásának becslésére. A vizsgálatok rámutattak, hogy a többlethatás mértéke jelentősen függ a kialakuló teljes csillapítás, azaz az aerodinamikuss és szerkezeti csillapítás előjeles összegének sebesség szerinti változékonyságától. Ennek feltárása teremti meg a kapcsolatot a két kitűzött cél között.

A megfogalmazott célok eléréséhez elegendő a merevítőtartó kétszabadságfokú, függőleges tengelyre szimmetrikus keresztmetszeti modellén vizsgálni. Lamináris áramlás esetén a mozgás teljes csillapításának zérussá válása (pozitívól negatívba való átmenete) adja a belebegési kritériumot, az ezt okozó U_F szélesebesség a belebegési sebesség.

1.3. A szerkezeti paraméterek

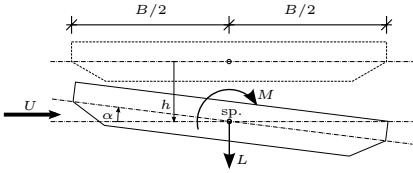
A szerkezet és az öngerjesztett erők alkotta mozgásegyenlet kezeléséhez a következő, Klöppel és Thiele (1967) által bevezetett dimenzióatlanított szerkezeti paramétereket alkalmaztam. A B szélességű, m tömegű, I torziós tehetetlenségű keresztmetszetenél $r_\alpha = \sqrt{\frac{I}{m} \frac{2}{B}}$ a tehetetlenségi relatív sugár, az ω_{0h} hajlítási (függőleges elmozdulási) és $\omega_{0\alpha}$ csavarási (elcsavarodási) sajátfrekvenciák aránya $\epsilon = \frac{\omega_{0h}}{\omega_{0\alpha}}$, $\mu = \frac{4m}{\pi\rho B^2}$ a relatív tömeg, $\epsilon_F = \frac{\omega_{0\alpha}}{\omega_F}$ a torziós és a belebegési frekvencia aránya.

2. Két forgatásos keresztmetszet modell

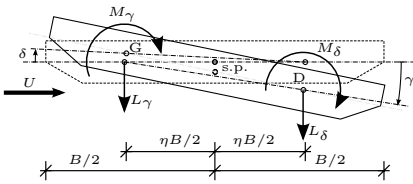
A továbbiakban „hagyományosnak” nevezett (1. ábra), h függőleges emelkedési és súlypontja körüli α elfordulási szabadságfokkal jellemzett keresztmetszet kapcsolt belebegése egy látszólagos forgástengely körüli periodikus elfordulás.

Az M43 autópálya Tisza-hídja kényszermozgásos szélcsatorna-kísérlettel meghatározott derivatívumai bizonyos mértékű mérési hibával terheltek. Vizsgálatot

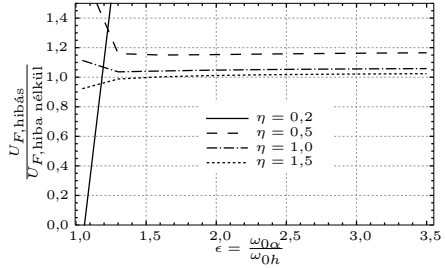
készítettem kicsinyített léptékű modell geometriai tökéletlenségéből számított, a derivatívumokat terhelő hibák felderítésére. A hibát a tökéletlenséggel és a tökéletlenség nélkül számított eredmény különbségeként definiáltam. A kényszermozgásos kísérlet két üteme során fixnek vélt emelkedési, majd elcsavarodási szabadságfok geometriai tökéletlenségéből adódó kis mértékű mozgását feltételeztem. Elemeztem a tökéletlenségéből a derivatívumokat terhelő hibákat, valamint az általuk számított belebegési sebességet terhelő hibát.



1. ábra. Emelkedési és elcsavarodási szabadságfokú „hagyományos” modell



2. ábra. Két forgatási szabadságfokú modell, ahol L és M az öngerjesztett emelőerő és nyomaték



3. ábra. A két forgatásos modell tökéletlenségéből számított hibás és hibátlan belebegési sebesség aránya. Síklap derivatívum, $r_\alpha = 0,5$, $\mu = 30$, elcsavarodási tökéletlenség 10%. Az η külpontosság növelésével mérsékelhető a belebegési sebesség hibája

Kidolgoztam olyan kétszabadságfokú keresztmetszeti modellt, amelyet a súlypontjához képest külpontosan elhelyezett két pont körüli elfordulás jellemez (2. ábra). Elméleti úton összefüggést adtam a „hagyományos” és a javasolt modell mozgásai, és az ezekkel kifejezett öngerjesztett erők azonossága révén a derivatívumok között, amelyeket a javasolt modellre definiáltam. A derivatívumok meghatározásának szélcsatorna-kísérlete a „hagyományos” modellével analóg módon történhet.

Definiáltam a geometriai tökéletlenségeket és megvizsgáltam a belőlük számítható, előzőekben említett hibákat. Síklap derivatívumaival megmutattam, hogy a két forgatásos modell geometriai tökéletlenségéből számított, a derivatívumokat terhelő hibák az alkalmazott külpontosság és a redukált sebesség függvényében miként alakulnak. Ezek közül a torziós sebesség derivatívumokat (H_2^* és A_2^*) emelem ki, ahol a hiba a külpontossággal fordított arányban áll.

Első gondolatra kézenfekvőnek tűnik, hogy a külpontosság a belebegéskor kialakuló „látszólagos” forgáspont körüli helyen, vagy ahhoz mérhető helyen legyen.

A geometriai tökéletlenség belebegési sebességre kifejtett hibájának vizsgálata (3. ábra) megmutatta, hogy az ennek minimalizálása szempontjából optimális külpontosság nem esik egybe a kapcsolt belebegés látszólagos forgáspontjával.

2.1. Az unimodális modell

A belebegési derivatívumok között a szakirodalom számos (közelítő) összefüggést tárt fel, amelyek azok redundanciáját hangsúlyozzák. A belebegéskor kialakuló mozgás kapcsolt volta és a redundancia adta a motivációt egy külpontos forgáspont körüli elcsavarodási szabadságfokú keresztmetszet unimodális modelljének létrehozásához. A kapcsolt belebegésnél a ϕ amplitúdóarány és φ fáziskülönbség kifejezhető

$$\phi = -\frac{2A_2^*}{\cos(\varphi)A_1^* + \sin(\varphi)A_4^*} \quad \text{és} \quad \text{tg}(\varphi) = \frac{\phi \sec(\varphi)H_1^* + 2H_2^*}{2H_3^*} \quad (2)$$

alakban. Leolvasható, hogy mindkét kifejezés közvetlenül nem függ a szerkezeti paramétereiktől, csak a belebegési redukált sebességtől függő derivatívumokon keresztül.

Az unimodális modell lehetőséget adna a fáziskülönbség és az amplitúdóarány megbecslése után a belebegési sebesség és frekvencia egyszerűbb számítására. A modellt a két forgatásos modellből származtattam úgy, hogy csak az egyik (a széltámadta oldali) forgáspontot tartottam meg. Ennek megfelelően a derivatívumokat α indexszel láttam el. Az unimodális csillapítatlan mozgásegyenlet komplex értékű sajátérték-feladatában megjelenő valós egyenlet szolgáltatja az ϵ_F belebegési frekvenciaarányra az

$$\epsilon_F = \sqrt{\frac{r_\alpha^2 + \phi^2 + \frac{8}{\pi\mu} A_{3\alpha}^*}{r_\alpha^2 + \frac{\phi^2}{\epsilon^2}}} \quad (3)$$

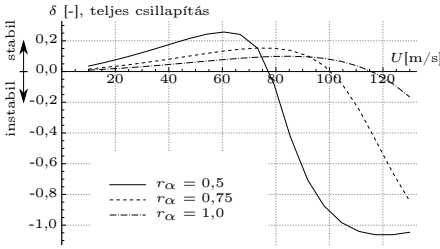
kifejezést. A belebegési kritériumot az $A_{2\alpha}^*$ zérussá válása adja, ami formailag megegyezik a tisztán torziós belebegésre használt formulával.

A derivatívumok közötti tapasztalati összefüggésekkel végzett egyszerűsítések a képleteket a szakirodalomban fellelhető kifejezéseké alakítják, azonban azoktól független úton. A vizsgálatok azonban rámutattak, hogy sem a ϕ amplitúdóarány, sem a φ fáziskülönbség nem mutat extrémális értéket a belebegéskor, előzetes megbecslésük további vizsgálatokat igényelnek. Az unimodális modell nem érte el a kitűzött célját, azonban a kidolgozás során feltárt összefüggések, eredmények hasznosnak tűntek, azok további vizsgálatokat indokolhatnak. Ennek ellenére a modell jövőbeli, akár részbeni felhasználhatósága nem vitatható, amire példát mutat Chen A. és Rujin (2011), akik a belebegés nemlineáris viselkedésének követésére alkalmas unimodális modell fejlesztésének kezdeti lépéseit ismertették.

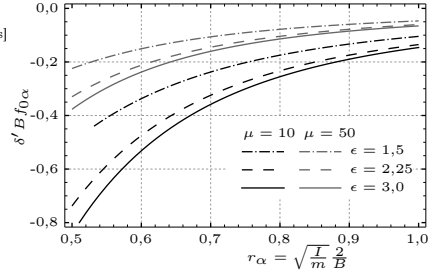
3. A belebegési puhaság

A belebegési sebesség érzékenységének egyik mérőszáma a δ teljes csillapítási logaritmikus dekrementum sebességi változékonysága (deriváltja), amellyel a Chen X. és Kareem (2006) a belebegési puhaságot definiálják. Puha belebegésnek definiálják azt, amikor a teljes csillapítás deriváltja a belebegési sebességnél kicsi értéket vesz fel, nagy értéknél kemény belebegésről beszélhetünk. (A „kicsi” és a „nagy” nincs számértékhez kötve, csak két eset összevetésére szolgál.) A 4. ábra mutatja az r_α torziós tehetetlenségi relatív sugár módosító hatását a belebegési sebességre és puhaságra. Vizsgálataim során a két mozgáskomponens fáziskülönbsége és a teljes csillapítás között összefüggés mutatkozott. A puhaság megismerésének érdekében a belebegési derivatívumokat egytagú polinommal közelítő olyan eljárást dolgoztam ki, amely a szerkezeti paraméterek puhaságra gyakorolt hatását hivatkozott feltárni.

Az eljárással sikerült a csillapítás deriváltját $\delta' B f_{0\alpha}$ dimenzióatlanított formában kifejezni, ahol $f_{0\alpha} = \frac{\omega_{0\alpha}}{2\pi}$ a torziós sajátfrekvencia és δ' a puhaság.



4. ábra. Csillapítás-sebesség diagramja különböző csavarási tehetetlenségeknél, síklap, $\mu = 30$, $\epsilon = 3$, $B = 20$ m, $\omega_{0h} = 1$ rad/s



5. ábra. Belebegési puhaság síklap derivatívum esetére

Az 5. ábra ismerteti síklap derivatívumainak tisztán másodfokú közelítésével meghatározott puhaságot r_α függvényében. A szakirodalomban megtalálható Hardanger híd derivatívumaival végzett további vizsgálat alapján megállapítottam, hogy a szerkezeti paraméterek között fontossági sorrendet lehet alkotni a puhaságra kifejtett hatásuk alapján. A legerősebb hatást – természetesen – a belebegési derivatívumok fejtik, melyet az r_α torziós tehetetlenségi relatív sugár követ, majd az ϵ sajátfrekvenciák aránya, végül a μ relatív tömeg. Vizsgálataim alapján azt is megállapítottam, hogy a derivatívumok között van fontossági sorrend: a H_1^* , H_3^* , A_2^* és A_3^* befolyásolták a legjobban a puhaságot, míg a H_4^* gyakorlatilag elhanyagolhatónak mutatkozott.

Bár az eljárás (a derivatívumok közelítésének pontosságától függően) csak a

puhaság minőségi vizsgálatára alkalmas, segítséget adhat konkrét alkalmazásnál a belebegési sebesség növelésének érdekében szükséges beavatkozás meghatározásához. Pl. a relatív tömeg szerinti függésből következően keskeny gyalogos hidak puhább belebegési hajlammal rendelkeznek, mint a közúti hidak, és emiatt a belebegési sebesség növeléséhez elegendő a szerkezeti csillapítás kisebb mértékű növelése, míg közúti hidaknál szükséges lehet a többi szerkezeti paraméterek változtatása is (pl. sajátfrekvenciák vagy geometria változtatása).

4. Az öngerjesztett erők többlethatása turbulens áramlásban

Az öngerjesztett erők hatását turbulens áramlásban parametrikus, időbeli analízissel vizsgáltam. A turbulens szelet Carassale és Solari (2002) ortogonális felbontáson (POD) alapuló algoritmusát alkalmaztam. Az öngerjesztett erőket Chen X., Matsumoto, et al. (2000) alapján vettem fel, akik a derivatívumok racionális függvényes közelítésével az erőket frekvenciafüggetlen leírással adták meg. Ezáltal az öngerjesztett erőket stacioner és instacioner tagok összegeként lehet felírni, amellyel a mozgások állapotterének bővítésével a

$$\mathbf{M}_1\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{C}_1\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}_1\mathbf{z} = \mathbf{q} \quad (4)$$

alakú állapotegyenlet állítható elő, ahol \mathbf{M}_1 , \mathbf{C}_1 és \mathbf{K}_1 a szerkezeti és aerodinamikus tömeg-, csillapítási és merevségi mátrix instacioner tagokkal bővített mátrixa, \mathbf{z} az elmozdulások és az instacioner változók alkotta állapottervektor, \mathbf{q} a szélleőkés-terhek bővített vektora.

A statisztikai elemzéshez – azonos paraméterekkel – 20 db 655 s hosszú futtatást végeztem $\Delta t = 0,04$ s időlépcsővel, az elmozdulások szórásnégyzetét átlagoltam, a statikus szélteher hatását figyelmen kívül hagytam. A turbulens áramlás jelenléte megkövetelte a belebegés új definícióját, amelyet azzal adtam meg, hogy a keresztmetszet egyik elmozduláskomponensének szórása bármilyen hosszú vizsgált időtartamra vetítve is statisztikailag állandó marad. A vizsgált derivatívumokkal kialakuló és a hidak többségét is jellemző torziós-ágú belebegésnél az elcsavarodás szórása már jóval a belebegési sebesség alatt látványosan megnövekszik, szemben a függőleges elmozdulásával, ahol ez csak a belebegési sebesség szűk környezetében, de hirtelen következik be.

Azt a többlethatást, amelyet az öngerjesztett erők fejtenek ki a szélleőkés-terhek okozta elmozdulásokra a

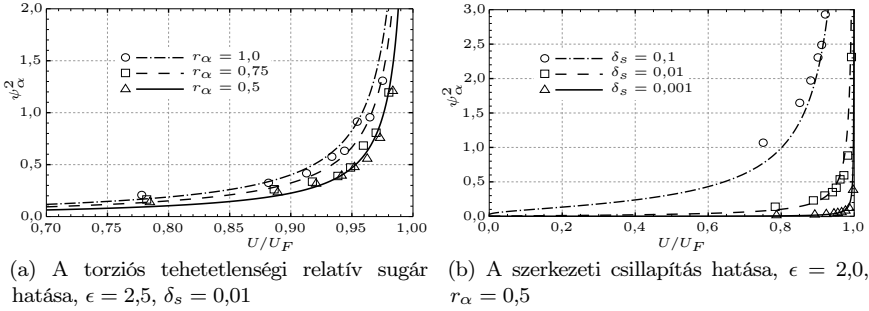
$$\psi_x^2 = \frac{\sigma_{x,b,se}^2}{\sigma_{x,b}^2} \quad (5)$$

szórásnégyzet-hányados bevezetésével jellemeztem, ahol σ^2 az elmozdulás szórásnégyzete, $x = h, \alpha$ az elmozduláskomponens, $(\)_b$ index a szélleőkés okozta elmozdulás, $(\)_{b,se}$ a szélleőkés és öngerjesztett erők okozta elmozdulás. A hidak nagy

hányadánál előálló torziós ágú belebegés miatt csak az elcsavarodást vizsgáltam. A paraméteres vizsgálattal előálló értékekre, elméleti megfontolások alapján felépített

$$\psi_\alpha^2(U) = \frac{A_3^*}{\mu\pi r_\alpha} \frac{1}{U_F} \frac{1}{\left(\frac{U}{U_F}\right)^{0,02\delta'/\delta_s} - 1} \quad (6)$$

képletet illesztettem síklap derivatívumaira (6. ábra), ahol U és U_F a [m/s] dimenziójú sebesség és belebegési sebesség, δ_s a szerkezeti csillapítási dekrementum, δ' a puhasággént definiált teljes csillapítási dekrementum deriváltja a belebegési sebességnél, utóbbi [s/m] dimenzióval, A_3^* a belebegési derivatívum értéke a belebegési redukált sebességnél.



6. ábra. Elcsavarodás szórásnégyzet-hányadosának számított értékei és görbeillesztése, közös paraméterek: $\mu = 10$, $B = 5$ m, $\omega_{0h} = 1$ rad/s

A 6a ábra mutatja az azonos paraméterek esetén az r_α tehetetlenségi relatív sugár hatását, az 5. ábrával összhangban a belebegés puhasági hatását. A 6b ábra pedig a szerkezeti csillapítás mértékének hatását ábrázolja, ahol megmutatkozik, hogy a szélesebbes csökkentésével növekszik a görbe és a számított értékek közötti eltérés, ami a képlet alkalmazhatóságának alsó határát jelzi.

A két mozgáskomponensben eltérő mértékben jelentkeznek az öngerjesztett erők hatása. A (6) egyenlettel megadott, illesztéssel kalibrált képlet hangsúlyozza, hogy a különbség mértékét döntően a belebegés puhasága és a szerkezeti csillapítás határozza meg. A számítások alátámasztották azt a megfigyelést is, hogy az öngerjesztett hatások, a légmozgás okozta pozitív aerodinamikusan keresztül jelentősen csökkenthetik a csak szellőkésékből számított elmozdulások szórását.

5. Tudományos eredmények

5.1. Új tudományos eredmények

A dolgozatban ismertetett kutatás tudományos eredményeit az alábbiakban foglalom össze.

5.1.1. 1. tézis

Az öngerjesztett erők hidak merevítőtartójjára kifejtett hatásának vizsgálatára létrehoztam a keresztmetszet súlypontjához képest külpontosan elhelyezett két pont körüli forgatási szabadságfokú keresztmetszet-modellt.

- A modellen megvizsgáltam a keresztmetszet feltételezett mozgásainak geometriai tökéletlenségéből a belebegési derivatívumokat terhelő hibákat.
- Ehhez hasonlóan meghatároztam a függőleges elmozdulású és a súlypontja körül elcsavarodó keresztmetszet feltételezett mozgásainak tökéletlenségéből a belebegési derivatívumokat terhelő hibákat.
- Megmutattam síklap keresztmetszet derivatívumaival, hogy a javasolt két forgatási szabadságfokú modellen azonos mértékű geometriai tökéletlenség esetén kisebb a derivatívumokban, valamint a belebegési sebességben keletkező hiba.
- A két forgatási középpont súlyponthoz képesti külpontosságával kapcsolatban bemutattam, hogy annak, a fenti hibák minimalizálása szerinti optimális helyzete nem esik egybe a kapcsolt belebegés látszólagos forgási középpontjával.

Kapcsolódó publikáció: Hunyadi és Hegedűs (2012b).

5.1.2. 2. tézis

Chen X. és Kareem (2006) által definiált belebegési puhaság vizsgálatára kidolgoztam a belebegési derivatívumok egytagú polinomiális közelítésével egy eljárást, amellyel a belebegési puhaság mértéke kifejezhető a derivatívumok és a szerkezet dimenziótlanított dinamikai jellemzőinek függvényében.

- Az eljárás alkalmas a belebegési puhaság minőségi elemzésére.
- A rendelkezésemre álló derivatívumokkal (síklap és Hardanger híd) fontossági sorrendet állítottam fel a szerkezet dimenziótlanított dinamikai jellemzői között a belebegési puhaságra kifejtett hatásuk alapján. A belebegési puhaságra
 - i. a legerősebb hatást a belebegési derivatívumok okozzák,
 - ii. a hídszerkezetek túlnyomó részét jellemző torziós-ágú belebegésnél a torziós tehetetlenségi relatív sugár,
 - iii. a szerkezeti sajátfrekvenciák aránya,
 - iv. legkisebb mértékben a relatív tömeg fejt ki hatását.
- Megmutattam, hogy a H_1^* , H_3^* , A_2^* és A_3^* derivatívumok befolyásolják leginkább a belebegési puhaságot, amely a H_4^* -re gyakorlatilag érzéketlen.
- Javaslatot adtam, hogy az eltérő szerkezeti paraméterekkel rendelkező hidaknál milyen döntések alapján lehet meghatározni a belebegési sebesség megnövelése

érdekében alkalmazandó szerkezeti beavatkozásokat.
Kapcsolódó publikáció: Hunyadi és Hegedűs (2012a).

5.1.3. 3. tézis

Kidolgoztam egy eljárást annak a többlethatásnak a vizsgálatára, amelyet az öngerjesztett erők fejtenek ki a szellőkés-terhek okozta elmozdulásokra. A többlethatást egy szorzótényező bevezetésével vizsgáltam.

- A szellőkés-terhek és az öngerjesztett erők együttes figyelembevételére alkalmas eljárás szolgáltatva állapotegyenlet átrendezésével megmutattam, hogy a kibővített állapotter kapcsolott voltáért az instacioner hatásokat is magában foglaló csillapítási mátrix felel.
- Paraméteres vizsgálattal megmutattam, hogy a kétszabadságfokú keresztmetszet-modell két elmozduláskomponense, a belebegés hajlítási illetve csavarási ágú jellegétől függően, a belebegési puhaság függvényében eltérően változik a szélsébségtől.
- Síklap esetére megadtam egy empirikus képletet a belebegési sebességnél kisebb szélsébségek esetén az öngerjesztett erők az előzőekben leírt többlethatásának becslésére.
- Bemutattam, hogy a többlethatás mértékét szignifikánsan a belebegési puhaság és a szerkezeti csillapítás hányadosa befolyásolja.
- Megmutattam, hogy az öngerjesztett erők és a szellőkés-terhek közötti kapcsolat nem mutat analógiát a szerkezeti stabilitástanban jól ismert Southwell-féle szorzótényezővel.

Kapcsolódó publikáció: Hunyadi és Hegedűs (2012a).

5.2. A folyamatban lévő kutatások megállapításai

A folyamatban lévő kutatásaim következőkben összefoglalt eredményeit formai okok miatt nem szerepeltetem a tézisek között, de azokat tézis erejű megállapításoknak tartom.

- Megalkottam egy unimodális, egyszabadságfokú modellt, amellyel közelítő képletet adtam a kétszabadságfokú modell két mozgáskomponense fáziskésésére és amplitúdóarányára. A szakirodalomban megadott eljárástól független módon levezettem egy közelítő képletet a belebegési frekvencia meghatározására.
- Megmutattam, hogy kapcsolott belebegés nemcsak az elcsavarodási mozgáskomponens függőleges emelkedéshez képesti fáziskésése, hanem, a belebegési derivatívumoktól függően, fázissietése esetén is bekövetkezhet.
- A belebegés kritériumának definícióját kiterjesztettem a turbulens áramlásban létrejövő szerkezeti mozgások statisztikájára.
- A kibővített állapotter vizsgálatával alátámasztottam, hogy a belebegés létrejöttét minőségileg az instacioner öngerjesztett erők szabályozzák.

- A keresztmetszet két mozgáskomponensének fáziskülönbsége és a teljes csillapítás közötti összefüggés további vizsgálatokat indokolhat.

5.3. A kutatási terület további perspektívái

A belebegési sebesség definícióját át kell fogalmazni egy adott időtartamhoz kapcsolhatóan, amelyet a szerkezet dinamikai tulajdonságainak függvényében kell meghatározni. Az így definiált belebegési sebesség túllépése a szabványokban megkövetelt kockázati szintnek megfelelően a biztonsági tényező(k) újrafogalmazását vonhatja maga után, akár áttételes úton is. Ennek kidolgozására nemcsak az elméleti lehetőség adott, hanem gyakorlati és gazdasági igény is mutatkozik.

Turbulens áramlásban a belebegési sebesség környezetében létrejövő elmozdulások nagyobbak az aeroelasztikus hatások modellezésénél feltételezett mértéknél, az így létrejövő nemlineáris hatások és azok vizsgálata mindenképpen előtérbe kerül. Ennek megismerésének és alkalmas modellezésének fontosságát az áramvonalas keresztmetszetek vizsgálatai fokozottan hangsúlyozzák. Az új modellek alapot teremthetnek energia kinyerő berendezések kidolgozásához is.

Hivatkozások

- Carassale L. és Solari G. (2002). „Wind modes for structural dynamics: a continuous approach”. *Probabilistic Engineering Mechanics* 17.2, 157–166. old. ISSN: 0266-8920.
- Chen A. és Rujin M. (2011). „Self-excited Force Model and Parameter Identification for Soft Flutter”. *13th International Conference on Wind Engineering*.
- Chen X. és Kareem A. (2006). „Revisiting multimode coupled bridge flutter: Some new insights”. English. *Journal of Engineering Mechanics* 132.10, 1115–1123. old. ISSN: 0733-9399.
- Chen X., Matsumoto M. és Kareem A. (2000). „Time domain flutter and buffeting response analysis of bridges”. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE* 126.1, 7–16. old. ISSN: 0733-9399.
- Davenport A. G. (1961). „The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds”. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 87, 194–211. old.
- (1967). „Gust Loading Factors”. *Journal of the Structural Division* 93, 11–34. old.
- Klöppel K. és Thiele F. (1967). „Modellversuche im Windkanal zur Bemessung von Brücken gegen die Gefahr winderregter Schwingungen”. *Der Stahlbau* 36.12, 353–365. old.
- Rocard Y. (1963). „Instabilité des Ponts Suspendus dans le Vent—Expériences sur Modèle Réduit”. *National Physical Laboratory Paper* 10.
- Scanlan R. H. és Tomko J. J. (1971). „Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives”. *Journal of the Engineering Mechanics Division* 97.6, 1717–1737. old.

- Selberg A. (1961). *Oscillation and aerodynamic stability of suspension bridges*. Civil Engineering and Construction 13. ACTA Polytechnica Scandinavica.
- Theodorsen T. (1935). *General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter*. Jelentés 496. National Advisory Committee for Aeronautics.

Saját publikációk a témában

Folyóirat cikk

- Hunyadi M. és Hegedűs I. (2012a). „Hidak belebegés-vizsgálata turbulens szélben”. *Magyar Építőipar*. Befogadva.
- (2012b). „The sensitivity of the flutter derivatives and the flutter speed to the eccentricity of the cross section”. *Periodica Polytechnica*. Befogadva.

Konferencia cikk

- Hunyadi M. (2003). „A szél dinamikus hatásainak vizsgálata sztochasztikus eszközökkel”. *ÉPKO'2003: Nemzetközi Építéstudományi Konferencia*. Szerk. Gábor K. Cluj-Napoca: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 95–102. old. ISBN: 973-86097-3-9.
- (2009b). „Flutter analysis of an extradosed bridge in Hungary”. *5th European & African Conference on wind Engineering: Conference Proceedings*. Szerk. Borri C., D'Asdia P. és Spinelli P. Full paper on annexed CD. Firenze, 357–360. old. ISBN: 978-88-6453-038-3; 978-88-6453-041-3.

Előadás

- Hunyadi M. (2005). „A szél dinamikus hatásai hidakra”. *BME Mechanika Szeminárium*.
- (2008). „Hidak aerodinamikai instabilitása”. *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke PhD szeminárium*.
- (2009a). „Belebegési derivatívumok meghatározása szélcsatorna kísérlettel”. *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke PhD szeminárium*.
- (2009c). „Szelterhelés vizsgálata kettős modális transzformációval (DMT)”. *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke PhD szeminárium*.
- (2010a). „A Megyeri híd belebegési vizsgálata”. *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke PhD szeminárium*.
- (2010b). „Szél okozta hatások vizsgálata végeelem-programmal hidak merevítőtartóin”. *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke PhD szeminárium*.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.