

A DUNAÚJVÁROSI DUNA-HÍD LENGÉSVIZSGÁLATA

Joó Attila László - Hegedűs István***

RÖVID KIVONAT

Jelen cikk tárgya a Dunaújvárosi Duna-híd tervezésében való közreműködés keretében a Hidak és Szerkezetek Tanszékén elvégzett lengésvizsgálat módszerének és eredményeinek ismertetése. A vizsgálatban megalkottuk a meder fölötti hídszakasz rúd- és felületszerkezet-modelljét, és elvégeztük a két modell segítségével a híd lengésanalízisét. A vizsgálat eredményeit az Áramlástan Tanszék együttműködésével megvalósult szélcsatorna kísérlet [1] előkészítésében, ill. a híd földrengésvizsgálatában [3] használtuk fel. Az eredmények alapján javaslatot tettünk az aeroelasztikus stabilitásvesztés modellezéséhez szükséges kísérleti paraméterekre [2].

I. BEVEZETÉS

A hídszerkezetet terhelő szélterhek globális dinamikus hatásainak figyelembevételéhez három gerjesztő hatás részletes vizsgálata szükséges: (1) a lökészerű szélirányú terhek vizsgálata, (2) a pályaszerkezet örvénygerjesztésének vizsgálata, (3) a pályaszerkezet aeroelasztikai stabilitásának vizsgálata.

A tervezési szabályzatok szélterhelésre vonatkozó előírásait olyan szerkezetekre dolgozták ki, amelyeken a szélteher dinamikus hatása az ún. egyszerűsített eljárás alkalmazásával vehető figyelembe. Azoknak a szerkezeteknek a vizsgálatához, amelyeknél az egyszerűsítés alkalmazási feltételei nem állnak fenn, a szabályzatok – így az Eurocode 1991-4-2 is – olyan kiegészítő vizsgálatokra vonatkozó ajánlásokat adnak, amelyek kiinduló adatait – szakirodalmi források ill. kísérletek alapján – ismertnek feltételezik. A szakirodalom azonban csak egyszerű statikai vázú szerkezetekre vonatkozóan tartalmaz kellően részletes adatokat. Ahhoz, hogy az ún. részletes dinamikai vizsgálatot az összetett alakú merevítő tartós ívhídon végre lehessen hajtani, az alábbi előzetes vizsgálatok elvégzése szükséges:

- a hídszerkezet szabadlengés-alakjainak és frekvenciáinak meghatározása,
- a hídszerkezetre ható szélnyomás-eloszlás analízise, a pályaszerkezetre és az ívekre ható szélteher eltoló, emelő és elforgató keresztmetszeti eredőinek (c_D , c_L és c_M ún. erőtényezőinek) a meghatározása,
- az erőtényezők és a szélirány, ill. a pályaszerkezet síkja által bezárt szög kapcsolata,
- az örvényleválások aperiódikussá válásához tartozó sebességhatár, ill.

* okl. építőmérnök, egyetemi tanársegéd, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

** okl. mérnök, a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke, BME-MTA Mérnöki Szerkezetek Kutatócsoport

- a belebegést okozó kritikus szélesebbesség meghatározása.

Az elsorolt vizsgálatok elvégzésére a BME Áramlástan Tanszékével közös vizsgálati programot dolgoztunk ki. Megállapítottuk, hogy az áramlástan vizsgálatokhoz nem szükséges a teljes hídszerkezet aerodinamikai modellje, ehelyett elegendő annak a szerkezetrésnek a leképezése, amelyre a szélterhek túlnyomó része hat, ill. amelynek az alakja és mozgásai a dinamikus hatásokat alapvetően befolyásolják. Ez a szerkezet rész a híd hossza mentén állandó keresztmetszetű merevítő gerendákkal és hossztartókkal, egymástól azonos távolságban fekvő keresztmetszetű merevítő gerendákkal alátámasztott pályaszerkezet egy kellően reprezentatív szakasza (section model) lehet. A reprezentativitáshoz az is szükséges, hogy a szakaszmodell hossza valamennyivel haladja meg a szélességét. A szakaszmodell mereven rögzített állapotában végzett méréssel meghatározhatók a szélteher keresztmetszeti eredői és a pályaszerkezetre ható szélnyomás-eloszlás, a szélirány és az erőtényezők kapcsolatának vizsgálata pedig úgy végezhető el, hogy ezt a mérést a szakaszmodell síkjának a széliránnyal bezárt különböző szögei mellett megismételjük.

A belebegést okozó kritikus szélesebbesség vizsgálatához a szakaszmodellnek tükröznie kell a hídszerkezet gerjeszthetőségét. Ezt olyan rugalmas felfüggesztéssel biztosíthatjuk, amelyen a merevnek tekinthető modell a vizsgált jelenséget meghatározó paraméterű szabadlengést végez.

A belebegést okozó kritikus szélesebbesség vizsgálatához a szakaszmodell két szabadságú szabadlengését – egy függőleges transzlációs lengést és egy a modell hossz tengelye körüli forgó lengést – kell biztosítani, mégpedig olyan rugalmas kényszerekkel, hogy e két lengés frekvenciájának az aránya azonos legyen a pályaszerkezet hajlító és csavaró lengésével bekövetkező aeroelasztikus stabilitásvesztésben kombinálódó két lengésalak sajátfrekvenciájának arányával.

A modell felfüggesztésének megtervezéséhez tehát szükség van a pályalemez kombinálódó hajlító és csavaró lengéseihez tartozó frekvencia-arányokra, ezért a teljes hídszerkezet részletes lengésanalízisét még a szakaszmodell kísérletek megkezdése előtt el kellett végezni.

A földrengések hatásainak vizsgálatára jelenleg nincsen kötelezően alkalmazandó tervezési előírás, de a nagy támaszközű hidak erőtan mértezésében rendkívüli teherként figyelembe kell venni a földrengésterhet is. A vonatkozó irányelvek „a szakma elismert szabályai szerint” végzett vizsgálatot írnak elő. Ilyen vizsgálat jelentős és nagy méretű létesítmények esetén a szerkezeteknek a feltételezett földmozgásokra vonatkozó ún. válaszspektrumán alapuló igénybevétel-vizsgálat [3], amelynek elvégzésére az Eurocode 8 1. és 2. része ad javaslatot. A javaslat a lengésalakokhoz bevezeti az ún. modális tömegeket (tömegarányokat), és a vizsgálatban azoknak a lengésalakoknak a figyelembevételét tartja szükségesnek, amelyekhez a szerkezet teljes tömegének 90%-át adó összegzett modális tömeg tartozik. Konzolszerű, ill. kéttámaszú gerendaként viselkedő szerkezetek esetén ez a kritérium az első néhány sajátfrekvenciához tartozó lengésalak figyelembevételével könnyen teljesíthető, ívhidak és ferdekábeles hidak esetén viszont a kritérium teljesítése meglehetősen sok lengésalak figyelembevételét igényli.

A lengésvizsgálathoz numerikus modelleket építettünk, amelyeket a 2. fejezetben mutatunk be. A lengésvizsgálat eredményeit a 3. fejezetben közöljük.

2. NUMERIKUS MODELLEK

A dunaújvárosi híd lengésanalízisre alkalmas rúd- és felületszerkezet-modelljét az Ansys [4] általános célú végeleemes programban építettük fel. A két modell alkalmazását az indokolta, hogy a rúdszerkezet-modell jelentősen kevesebb szabadságfokkal, jóval egyszerűbben és gyorsabban felépíthető volt, mint a felületszerkezet-modell, amely viszont a szerkezetet pontosabban jellemzi. Úgy ítéltük meg, hogy egyes nagy számításigényű feladatokban (pl. a terhelés-történet modellezése) a rúdszerkezet-modell alkalmazása lényegesen előnyösebb.

2.1. Rúdszerkezet-modell

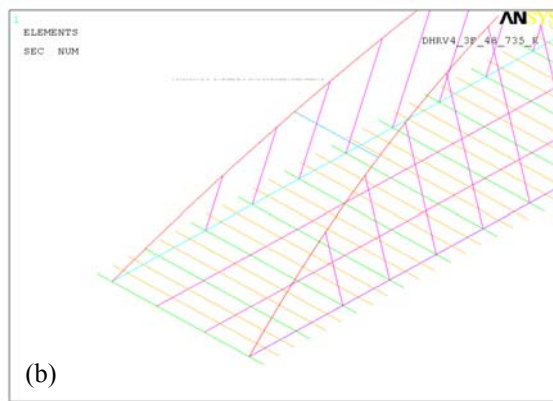
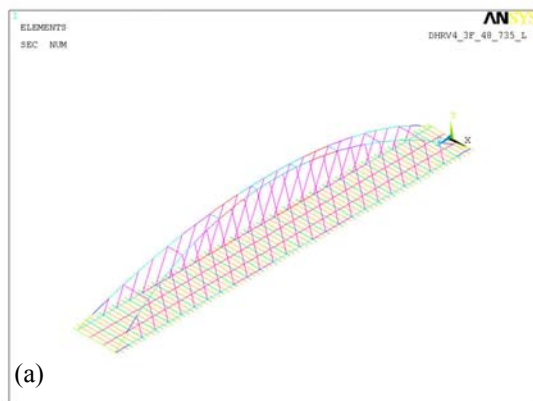
A teljes rúdszerkezet-modell képe és a végkialakítás részletei az 1. ábrán láthatók. A modellben alkalmazott elemtípusokat és azok helyeit az 1. táblázatban, az elemek számát, csomópontszámokat és a csomóponti szabadságfok számát pedig a 2. táblázatban tüntettük fel. A merevítőtartó és az ív találkozásánál lévő csomópontokban a híd megtámasztásainak megfelelő elmozdulás-kényszereket alkalmaztunk 1 (b) ábra.

1. táblázat: Rúdszerkezet-modellben alkalmazott elemtípusok

Elem jele	Elemtípus	Alkalmazás helye
BEAM44	3-D rugalmas gerendaelem	merevítőtartók, hossztartók, végkeresztartók, keresztartók, keresztkötések, ív, ívátkötés
LINK10	csak húzásra működő rúdelem	kábelek

2. táblázat: Rúdszerkezeti modell adatai

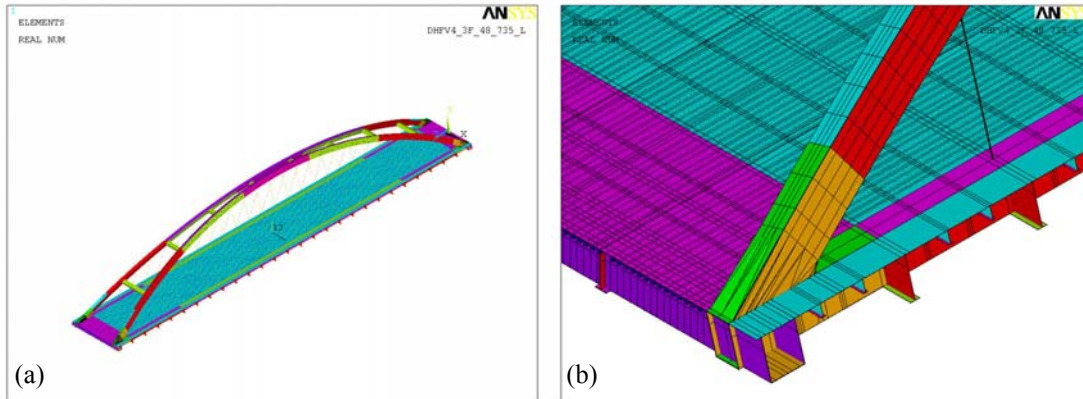
	Elemszám	Csomópontszám	Elmozdulási szabadságfok száma
rúdmodell	6 200	12 052	72 312



1. ábra: A teljes rúdszerkezet-modell (a) és a hídvég részlete (b)

2.2. Felületszerkezet-modell

A vizsgálatainkban alkalmazott felületszerkezet-modell geometriai alapadatai megegyeznek a rúdszerkezet-modellével. A teljes modell képe és a hídvég részlete a 2. ábrán látható. A 3. és 4. táblázatban összefoglaltuk a felületszerkezeti modellben alkalmazott elemtípusokat, illetve elem és csomópontszámokat.



2. ábra: A teljes felületszerkezet-modell (a) és a hídvég részlete (b)

3. táblázat: Felületszerkezet-modellben alkalmazott elemtípusok

Elem jele	Elemtípus	Alkalmazás helye
SHELL181	4 csomópontú héjelem	merevítőtartók, hosszartók, végkeresztartók, keresztartók, keresztkötések, ívek, ívátkötések, ortotróp pályalemez
LINK10	csak húzásra működő rúdelem	Kábel
BEAM24	3-D gerendaelem	a pályalemezben lévő bordák, az ívben lévő bordák

4. táblázat: Felületszerkezet-modell adatai

	Elemszám	Csomópontszám	Elmozdulási szabadságfok száma
felületmodell	67 102	63 444	380 664

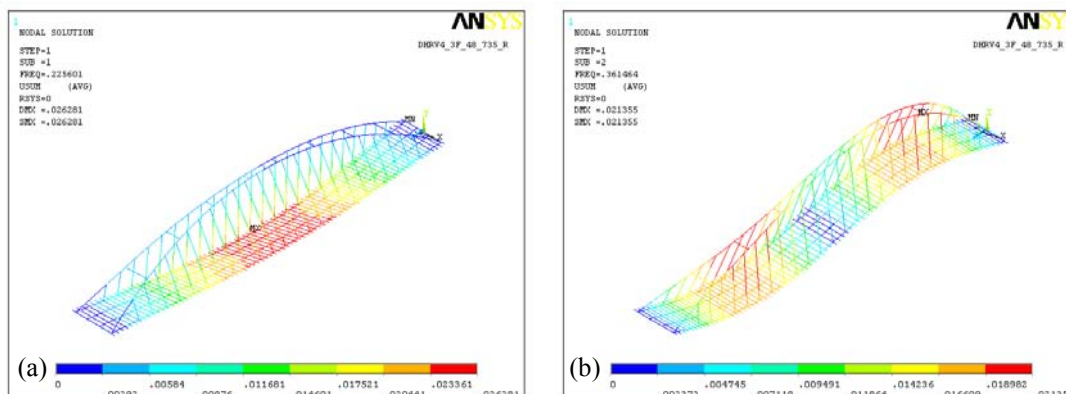
Mindkét modell automatikus építésére Matlab-ban [5] fejlesztettünk programot. A Matlab és az Ansys programcsomagot összekapcsoló eljárás nemcsak a modell felépítését, hanem a számítás vezérlését és az eredmények kiértékelését is lehetővé tette.

A dinamikai vizsgálathoz a szerkezet lengő tömegeit a modell csomópontjaiba koncentrált tömegekkel képeztük le. Ezen a dinamikai modellen modálanalízist hajtottunk végre, eredményként a szerkezet sajátfrekvenciáit és lengésalakjait kaptuk.

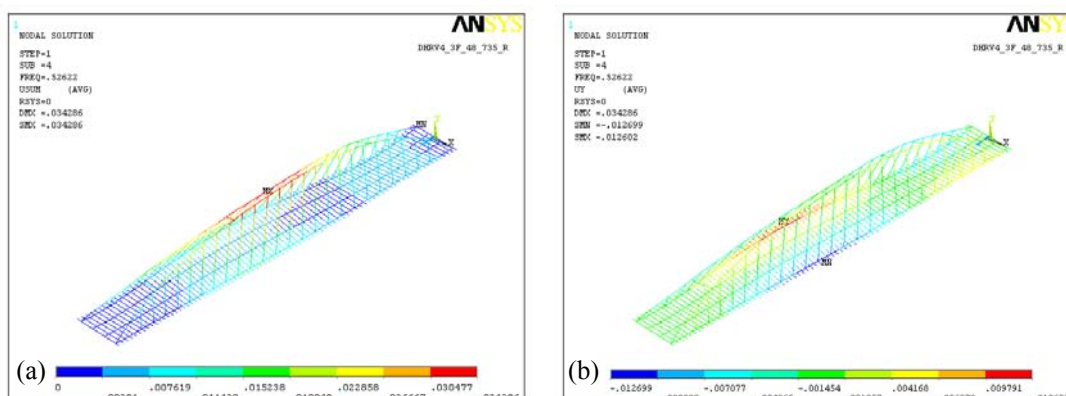
3. A LENGÉSVIZSGÁLAT EREDMÉNYEI

3.1. A rúdszerkezet-modell eredményei

A rúdszerkezet-modell lengésalakjait a 3. és 4. ábrákon mutatjuk be. Ezen a modellen a legkisebb sajátfrekvenciához tartozó lengésalak a pályaszerkezet vízszintes síkú lengése, második alak a teljes híd függőleges síkú, míg a harmadik alak az ív vízszintes síkú lengése. Az utóbbiban a kábeleken függő pályaszerkezet elcsavarodó lengést végez, a lengés hullámhossza a támaszköz 2/3-a.



3. ábra: Az 1. (a) és a 2. (b) lengésalak elmozdulásainak abszolút értéke

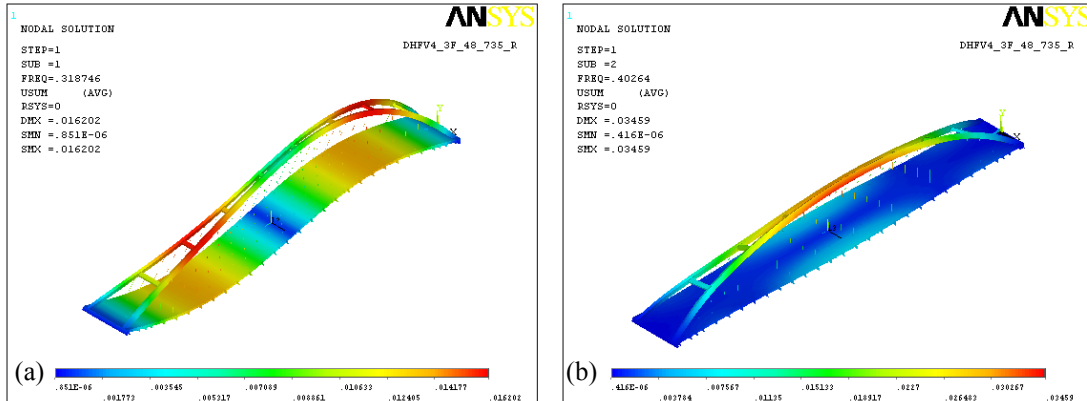


4. ábra: A 3. lengésalak elmozdulásainak abszolút értéke (a), és függőleges elmozdulásai (b)

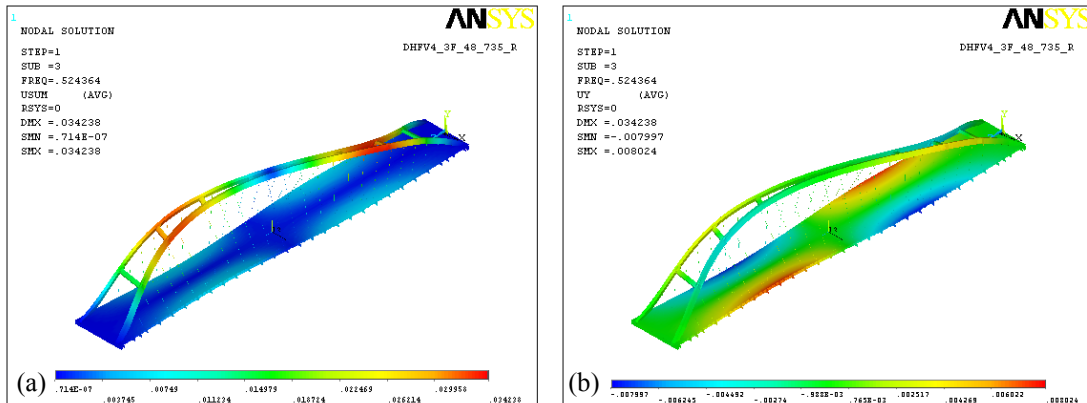
3.2. A felületszerkezet-modell eredményei

A valóságban a pályaszerkezet vízszintes síkú lengése nincs az első sajátlengésalakok közt. A rúdmodellben azért ez az első alak, mert hiányzik a modelltől a pályalemez vízszintes merevsége. A felületszerkezet-modellben – és a valóságban - első helyen a függőleges síkú, két félhullámú hajlító lengés szerepel. A második és harmadik alakban az ív vízszintes síkú, egy, ill. két félhullámú lengése dominál. Az ív vízszintes

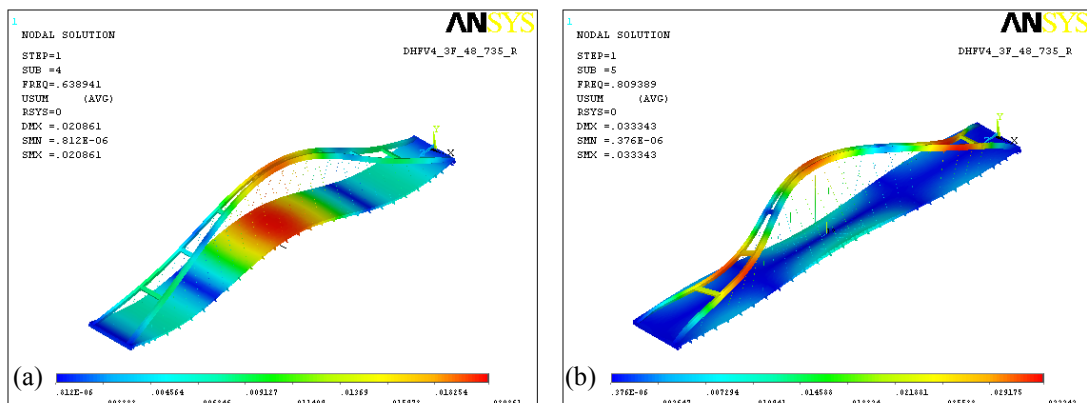
síkú lengéseit az ívre függesztett pályaszerkezet hasonlóan elcsavarodó lengéssel követi, lásd 5. és 6. ábrák. A 7. és 8. ábrákon további lengésalakokat mutatunk be.



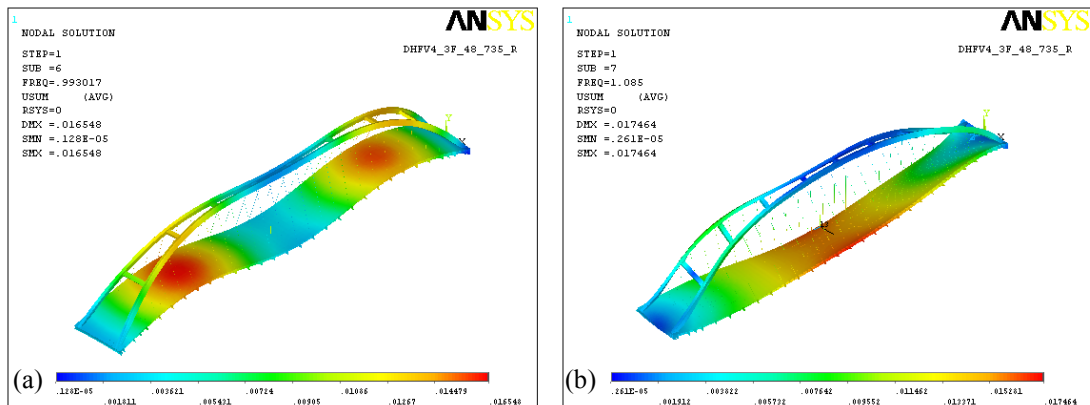
5. ábra: Az 1. (a) és a 2. (b) lengésalak elmozdulásainak abszolút értéke



6. ábra: A 3. lengésalak elmozdulásainak abszolút értéke (a) és függőleges elmozdulásai (b)



7. ábra: A 4. (a) és az 5. (b) lengésalak elmozdulásainak abszolút értéke



8. ábra: A 6. (a) és a 7. (b) lengésalak elmozdulásainak abszolút értéke

3.3. A lengéseredmények értékelése

A rúdszerkezet-modell pályaszerkezetének kicsiny vízszintes síkú merevségéből adódó és könnyen kiszűrhető eltérésektől eltekintve, a két modell lengéseredményei megnyugtató egyezést mutattak a hídszerkezet legkisebb sajátfrekvenciái és az ezekhez tartozó lengésalakok tekintetében. Az eredmények reális voltát támasztották alá azok a kézi számítással elvégezhető nagyságrendi ellenőrzések is, amelyek a sajátfrekvenciák közelítő értékeit az ún. parciális megmerevítés elvén, a Dunkerley-tétel alkalmazásával adják meg.

A függőleges hajlító lengések „tisztán” megjelennek, a vízszintes síkú és csavaró lengések kombinálódnak. Ez a híd súlypontjának és rugalmassági középpontjának eltérő magasságából adódik. A függőleges síkú hajlító lengések azért lépnek fel tisztán mert mindkét pont a híd teljes keresztmetszetének szimmetriatengelyében van a vízszintes irányú hajlító lengések pedig azért kapcsolódnak össze a csavarási lengésekkel mert az említett pontokhoz kötődő hatások különböző magasságban működnek [6].

Mivel a felületszerkezeti numerikus modell a szerkezeti részletek és a tömegeloszlás pontosabb figyelembevételét teszi lehetővé, a részletes vizsgálatok céljára ennek a modellnek az eredményeit vettük figyelembe.

A szél dinamikai hatásainak vizsgálata szempontjából az ún. domináns sajátlengés-alak és sajátfrekvencia mellett fontos azoknak a lengésalakoknak, ill. sajátfrekvenciáknak az ismerete, amelyekhez a pályaszerkezet egymással aerodinamikailag kombinálódó hajlító és csavaró lengése tartozhat. A gerendahidaknál ezek a kombinálódó lengések általában az egy félhullámú lengések, ívhidaknál és kábelívekre függesztett hidaknál viszont a pályaszerkezet egy félhullámú lengéseivel az ívek számottevő hosszváltozása tartozik, míg a két félhullámú lengések az ívek hosszváltozása nélkül is ki tudnak alakulni. Várható ezért, hogy esetünkben a domináns lengésalakhoz is, az aerodinamikailag kombinálódó lengésalak-párhoz is a pályaszerkezet két félhullámú lengése tartozik.

A számítási eredmények szerint a domináns sajátlengés-alakhoz valóban a pályaszerkezet olyan elmozdulásai tartoznak, amelyeket jó közelítéssel két félhullámú hajlító lengésnek tekinthetünk (5 (a) ábra), és valóban található az első sajátlengés-alakok közt olyan, – a harmadik (6 (b) ábra) – amelyben a pályaszerkezet jó közelítéssel két félhullámú csavaró lengést végez. A két lengésalakhoz tartozó sajátfrekvenciák ará-

nya $\varepsilon = 1.645$, ami magasabb annál az értéknél, ami a hasonló keresztmetszet-kialakítású gerendahidak szokásos frekvencia-aránya.

Az aerodinamikai modellkísérletek kiinduló adataként a pályaszerkezet részletes rajza mellett ezeknek a lengéseknek a sajátfrekvenciáit adtuk meg az Áramlástan Tanszéknek. A kiemelt két kombinálódó lengésalakhoz tartozó sajátfrekvenciák aránya határozta meg a – merev testként lengő – szakasz-modellt megtámasztó rugók merevségét.

A vizsgálatban használt kétféle modell lengéseredményeinek igen jó egyezése tette lehetővé, hogy a híd tengely-irányú földrengésterhek vizsgálatában a rúdmodell kisebb szabadságfokú változatát alkalmazzuk. Ugyanakkor a rúdmodell pályaszerkezetének vízszintes síkú lengése – mely a felületszerkezet-modellből hiányzott – mutatott rá arra, hogy a merevítőtartó és hossztartó feszültségeinek számításához alkalmas rudakból összeállított tartórács nem képes olyan tárcsahatásra, mint a felületszerkezet-modellben meglévő pályalemez. Ennek a hatásnak a hiánya, mint láthattuk [7], a teljes rúdszerkezeti modell erőjátékát befolyásolta, ezért a továbbiakban a szilárdsági vizsgálatokhoz a felületszerkezet-modellt alkalmazzuk. A rúdmodell kisebb szabadságfoka a szélteherre történő időfüggő vizsgálatot is lehetővé tette, melyet a Főmterv Rt végzett el a SOFiSTiK program szélmoduljának támogatásával.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A dunaujvárosi Duna-híd lengésvizsgálatát két független numerikus – rúd- ill. felületszerkezeti-modellen – végeztük el. Az eredményeket felhasználtuk az Áramlástan Tanszék Kármán Tódor Szélcsatorna Laboratóriumában végrehajtott szakasz-modell kísérlet tervezésére [1]. A kétféle modell eredményeinek egyezése lehetővé tette számunkra, hogy a földrengésvizsgálatot a kevesebb szabadságfokkal rendelkező rúdmodellen végezzük el.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Goricsán I. - Balczó M. - Lajos T.: A Dunaujvárosi Duna-híd aerodinamikai vizsgálata: szélcsatorna kísérlet, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke, Tudományos közlemények*, Budapest, (2005).
- [2] Hegedűs I.: Nagy támaszközű ívhidak tervezésének a szélteherrel kapcsolatos kérdései, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke, Tudományos közlemények*, Budapest, (2005).
- [3] Vigh L.G. - Dunai L. - Kollár L.: Duna-hidak földrengésvizsgálata, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke, Tudományos közlemények*, Budapest, (2005).
- [4] Ansys Documentation, Ansys, Inc., 2003
- [5] Matlab 6.1 Release 12.1, The MathWorks, Inc.
- [6] Dr. Kollár L.: *A szél dinamikus hatása magas építményekre*, Műszaki Könyvkiadó, 1979.
- [7] Honfi D. - Joó A. L. - Dunai L. - Ádány S.: A Dunaujvárosi Duna-híd szerkezeti változatainak paraméteres vizsgálata, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke, Tudományos közlemények*, Budapest, (2005).