

A DUNAÚJVÁROSI PENTELE HÍD ERŐTANI MÉRETEZÉSÉHEZ KAPCSOLÓDÓ ELMÉLETI ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATOK

Dunai László

egyetemi tanár
BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke
ldunai@epito.bme.hu

Kollár László P.

egyetemi tanár
BME Tartószerkezeti és Szilárdságtani Tanszék

Hegedűs István

egyetemi tanár
BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

Lajos Tamás

egyetemi tanár
BME Áramlástan Tanszék

Bevezetés

A dunaújvárosi Pentele híd mederhídjának szerkezeti kialakítása, geometriai mérete, gyártás- és szereléstechnológiai eljárása olyan összetett szerkezeti viselkedést eredményezett, amely a tervezési szabványokat közvetlenül alkalmazó méretezési módszerekkel nem vizsgálható (Horváth et al., 2006). A viselkedés sajátosságainak feltárása és a létesítmény kiemelkedő volta egyaránt szükségessé tett egy sor elméleti és kísérleti vizsgálatot, amelyek elegendő adatot és ismeretet szolgáltatnak a kellően biztonságos, egyszersmind gazdaságos szerkezet megtervezéséhez. Ezeket a vizsgálatokat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) végeztük el az alábbiak szerint:

Az ívstabilitás vizsgálata • lengésvizsgálat • aerodinamikai vizsgálatok • földrengésvizsgálat • stabilitásvizsgálat a beúsztatás állapotában.

Az alábbiakban a felsorolt vizsgálatok alapelveit, módszereit, legfontosabb eredményeit és az ezek alapján levont következtetéseket ismertetjük.

Az ívstabilitás vizsgálata

Az acélszerkezetű mederhíd ún. kosárfül alakú ívpárra kábelekkal felfüggesztett pályaszerkezet. Az útpálya terhei a pályalemezen és a keresztirányú gerendákon adódnak át az ívek síkjában futó merevítő tartókra, ezeket párhuzamos kábelsorok kapcsolják az ívhez. A kábelek által közvetített terhek az ívek teljes hosszán ívtengely irányú nyomóerőt keltenek, ezzel egyidejűleg jelentős, az ívek különböző szakaszain eltérő nagyságú hajlító nyomaték is fellép.

Az ilyen terhelésű ívek jellemző tönkremeneteli módja a nyomóerő hatására bekövetkező stabilitásvesztés. Egyedül álló ívek, illetve párhuzamos síkokban futó, egymással össze-

kapcsolt ívpárok esetén az ívkihajlás az ívek síkjába eső vagy az ívek síkjára merőleges elmozdulásokkal jön létre. Ezeket a kihajlási formákat a globális stabilitásvesztés „tisztá” formáinak szoktuk nevezni. A kosárfülszerűen elrendezett, egymáshoz támaszkodó ívek az ívstabilitás szempontjából kedvezőbbek a „tisztá” formák valamelyikével kihajló íveknél, de a stabilitásvesztésük során a „tisztá” formáktól meglehetősen különböző, ún. „kombinált” globális kihajlási alak jön létre. Az ívkihajlás okozó normálerő, illetve teher nagysága ideálisan rugalmas szerkezet esetén is érzékenyen függ a kihajlási alaktól, ez az érzékenységi reális, rugalmas-képlékeny anyagú, lokális stabilitásvesztésre is képes szerkezetnél még inkább fennáll. Ezért a kihajlási jelenség követezéséhez részletes, egyedi vizsgálatra volt szükség. A stabilitás vizsgálatára numerikus és empirikus vizsgálatokból álló programot dolgoztunk ki.

A stabilitásvizsgálat kiinduló gondolata az volt, hogy a szabványos méretezési előírások a reális szerkezeti viselkedést az ideálisan rugalmas anyagúnak tekintett szerkezetekre vonatkozó vizsgálati eredmények korrekciójával, illetve az ideálisan rugalmas szerkezetekre vonatkozó szerkezeti paraméterek alapján levezetett méretezési értékekkel veszik figyelembe. Ha tehát a meglehetősen egyedi kialakítású hídszerkezetet ideálisan rugalmas szerkezetként vizsgálva elő tudjuk állítani a korrigálandó eredmények, illetve a méretezési értékek levezetésére alapul szolgáló szerkezeti paraméterek megfelelőit, ezek alapján a megkövetelt biztonság ellenőrzése tekintetében visszavezethetjük a szerkezet méretezését a szabványok rutinszerű alkalmazására.

A numerikus vizsgálat elsődleges célja ennek megfelelően a globális stabilitásvesztés szempontjából várhatóan kritikus állapotok

meghatározása, a méretezési szabványok kontextusában értelmezhető szerkezeti paraméterek levezetése és a különböző tervezési szabványok által a stabilitásvesztési formákkal szemben megkövetelt biztonság ellenőrzése, illetve összevetése volt. A modellkísérletet azzal a céllal hajtottunk végre, hogy kísérletileg is ellenőrizzük a szabványok előírásai szerint ilyen módon elvégezhető méretezés és ellenőrzés tényleges alkalmasságát.

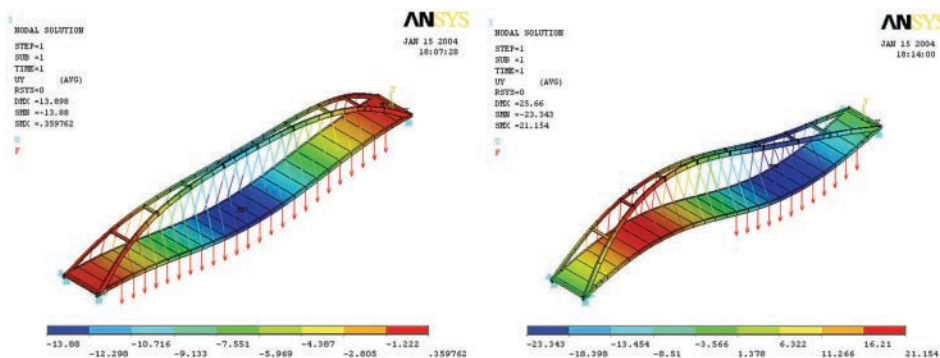
Numerikus vizsgálat

A numerikus vizsgálatok egyik csoportja magára a megtervezendő szerkezetre, a másik pedig a modellkísérlet céljából készült hídmodellre vonatkozó vizsgálat – mintegy a reális anyagú modellvizsgálat numerikus szimulációja – volt. A numerikus szimuláció mind a rugalmas viselkedés, mind a tönkremeneteli módok vizsgálatára kiterjedt.

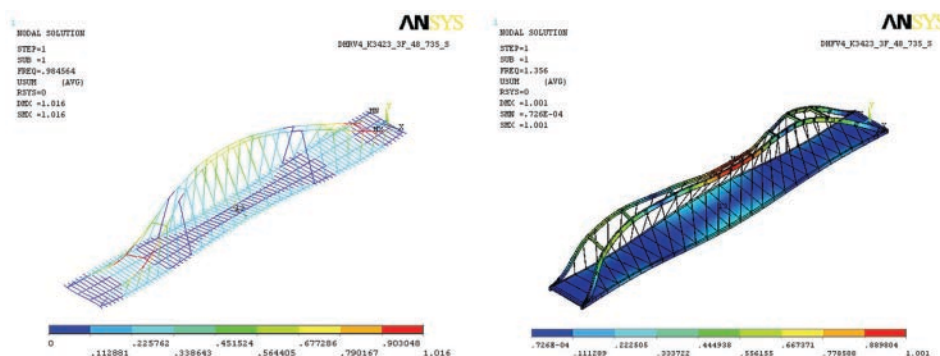
A szerkezet „pontos” vizsgálatát az Ansys programrendszerrel végeztük, ún. felületszerkezeti végeeselemes modell alkalmazásával. A vizsgálat eredményeit az 1. és 2. ábrák szemléltetik. A 3. ábrán a két mértékadó tönkremeneteli módhoz tartozó kísérleti és számított erő–elmozdulás diagramok láthatók. A jó egybeesés a nemlineáris numerikus analízis megbízhatóságát mutatja.

A szerkezet tényleges teherbírására vonatkozóan megkövetelt biztonságot három méretezési szabványt javasolt módszerrel, azaz a Magyar Szabvány (MSZ), a Japán Szabvány (JSHB), és a közös európai acélszabvány (Eurocode 3) három módszerrel vizsgáltuk totális és féloldalas teher esetén. Az eredményeket az 1. táblázatban foglaljuk össze.

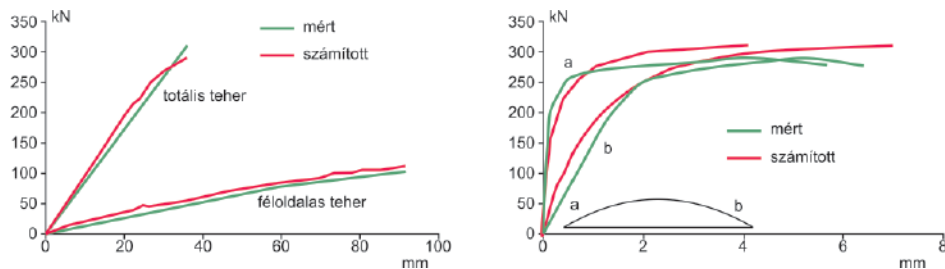
Ha figyelembe vesszük, hogy a híd erőjátékában a kb. 12 000 kN maximális parciális hasznos teher mellett dominál a kb. 90 000 kN nagyságú totális állandó teher hatása, azt



1. ábra • Hídmodell numerikus analízis – lineáris vizsgálat



2. ábra • Hídmodell numerikus analízis – stabilitási vizsgálat



3. ábra • Hídmodell numerikus analízis – nemlineáris vizsgálat

állapíthatjuk meg, hogy a híd méretezésére alkalmazott MSZ-előírások az ív globális tönkremenetelével szemben kielégítő, több mint 2,2-szeres biztonságot nyújtanak (Joó – Dunai, 2005).

Modellkísérlet

A modellkísérletekre a BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában került sor (Joó et al., 2005).



4. ábra • Kísérleti hídmodell

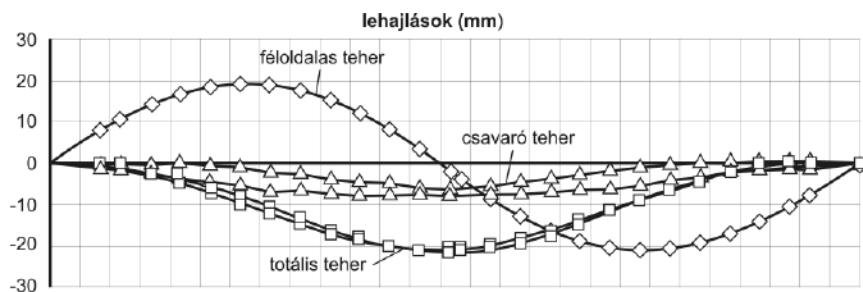
A híd és a hídmodell közötti kapcsolatot léptékfüggetlen mechanikai jellemző, a nyomott ív relatív karcsúsága teremtette meg. A mérési rendszert úgy terveztük meg, hogy az ív kihajlási elmozdulásainak mind az ívsíkokba, mind a síkokra merőleges összetevői vizsgálhatók legyenek. A statikai és laboratóriumi adottságok alapján a modell M=1:34 méretarányúra adódott, 8991 mm-es hosszal (4. ábra). Az ívek keresztmetszete 100 × 40 × 3 mm-es hegesztett zártszelvény, a merevítő tartók 80 × 40 × 3 mm-es hidegen hajlított zártszelvényű rudak, anyagminőségük S235. A kábelek ekvivalens merevségű sodronykötelekkel lettek kialakítva. A modellt a Barabás Kft. gyártotta.

helő berendezés lehetőséget adott a hídmodell hossza mentén változó nagyságú és elrendezésű terhek alkalmazására, továbbá a két ív és a két merevítő tartó eltérő terhelésre is (csavaró teher). A hídmodellén 95 pontban mértük a különböző terhelések hatására bekövetkező nyúlásokat, 26-26 pontban a két merevítő tartó lehajlásait és öt pontban az ívek oldalirányú elmozdulásait.

	Totális teher	Féloldalas teher
MSZ	2.25	3.06
JSHB	3.07	3.28
EC3/1	2.20	1.87
EC3/2	1.45	1.84
EC3/3	2.29	2.15

1. táblázat • Ívstabilitási méretezési eljárások biztonsági szintje

Első lépésként – alacsonyabb teherszinteken – olyan méréseket hajtottunk végre,



5. ábra • Hídmodell lehajlási ábrái

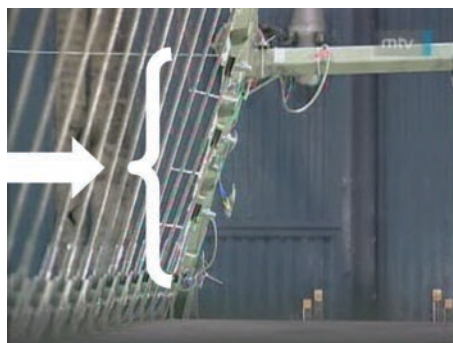
melyek során a szerkezet rugalmas állapotban maradt. A célunk ezekkel az volt, hogy megismerjük a hídmodell viselkedését különböző terhelési viszonyok esetén. Az 5. ábra lehajlási ábrái szemléltetik a szerkezet jellemző viselkedését totális, féloldalas és csavaró jellegű teher esetén. A mérési eredmények igen jó egyezést mutattak a numerikus vizsgálat eredményeivel, és igazolták a számítási eredményekben is megmutatkozó jellegzetességeket: a totális és féloldalas teherrel szembeni ellenállás jelentős eltérést és a csavaró jellegű terhekkel szembeni érzékenységet.

A kísérletek második fázisa a hídmodell teherbírási tönkremeneteli módjának meghatározására irányult, két különböző terhelési mód elemzésével. Totális terhelés esetén a domináns normálerő az ívek síkjára merőleges kihajlást, féloldalas terhelés esetén pedig

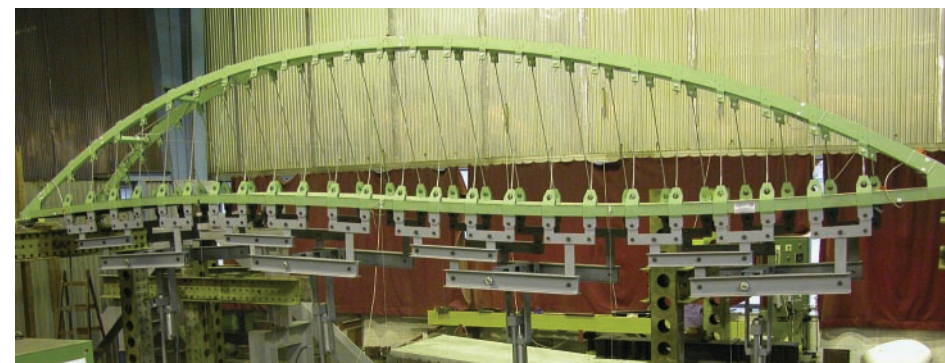
a domináns nyomaték síkbeli tönkremenetelt okozott. Először a totális terhelést fokozatosan növeltük, amíg 320 kN-os teljes tehernél az egyik ívégen – a végcsomópont és az első ívátkötés között – megindult az oldalirányú kihajlás (6. ábra). Mivel ez a tönkremeneteli mód nem okozott jelentős károsodást az ívben, lehetőség volt a parciális teher hatására bekövetkező tönkremenetel vizsgálatára is. A tönkremenetel 110 kN parciális teherrel következett be. A kihajlást megelőző alakváltozás másodrendű hatása igen nagy képlékeny deformációkat okozott, ez az ív síkjában bekövetkező ún. határpontos stabilitásvesztést (képlékeny instabilitást) okozott (7. ábra).

Lengésvizsgálat

A szél- és földrengéshatás elemzéséhez fel kell használni a hídszerkezet dinamikai jellemző-



6. ábra • Tönkremenetel – totális teher



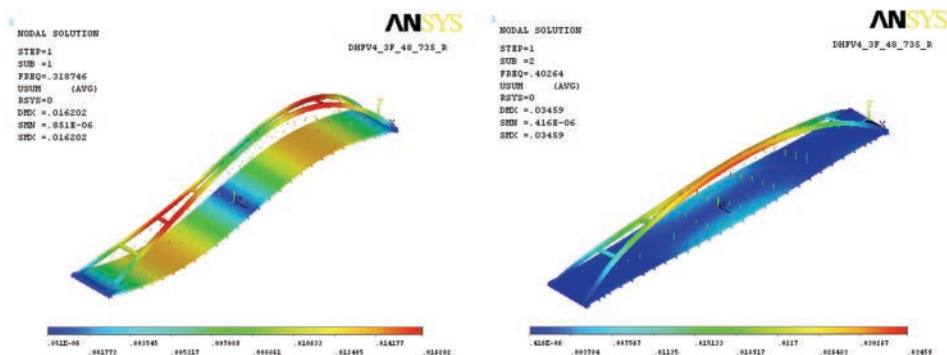
7. ábra • Tönkremenetel – féloldalas teher

it, elsősorban (a kihajlási alakokhoz hasonlóan kombinálódó) összetett szabad lengésalakokat és a hozzájuk tartozó sajátfrekvenciákat. Ehhez olyan „pontos” számítógépi modelleket kellett kifejleszteni, amelyek nagy pontossággal figyelembe tudják venni a híd tömegeloszlását és merevségi viszonyait, illetve olyan „közelítő” számításokat, amelyek rövid futásidővel képesek a nagy pontosságú számítási modell által szolgáltatott eredményeket jól közelíteni (Hegedűs – Kovács, 2007).

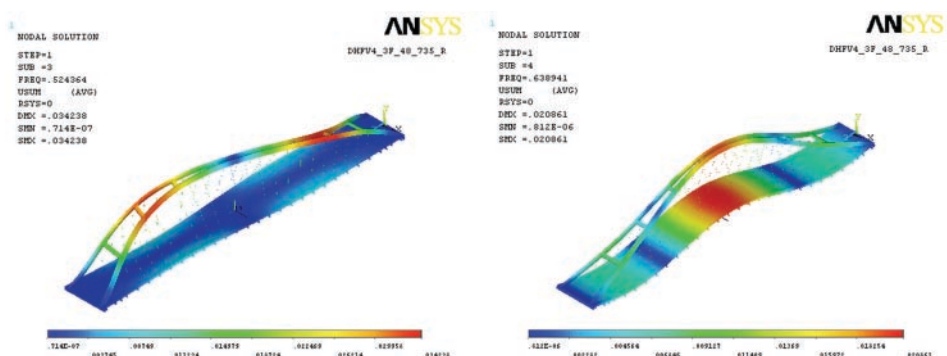
A mederhíd lengésvizsgálatát a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén hajtottuk végre, az aerodinamikai és a földrengésvizsgálatok igényeinek szem előtt tartásával (Joó – Hegedűs, 2005). A numerikus lengésanalízishez a híd általános célú vizsgálatra kifejlesztett felületszerkezet-modelljét és egy ezzel párhuzamosan fejlesztett, elsősorban a szél- és a földrengésteher-vizsgálat igényeinek szem előtt tartásával konstruált rúdszerkezet-modellt alkalmaztunk. A párhuzamos modellfejlesztést az indokolta, hogy a felületszerkezet-modell a szerkezeti részletek és a tömegeloszlás nagy pontosságú figyelembe vételét teszi lehetővé, viszont meglehetősen nagy futtatási időt igényel, míg az egy nagyságrenddel alacsonyabb szabadságfokú rúdszerkezetmodell a „globális” szerkezet viselkedését a „pontos” mo-

dellhez hasonló megbízhatósággal képes leírni, töredéknyi futtatási idővel. Ez az előny leginkább az időben változó hatások újbóli és újbóli kiszámítását igénylő szélteher-szimulációban érvényesíthető. Mindkét modellel lehetőség volt a szerkezet szabad lengésalakjainak a sajátfrekvenciák növekvő értékei szerinti kirajzolására. Ezek vizsgálata alapján az alábbi megállapítások tehetők.

A hídnak meglehetősen sok egymáshoz közeli sajátfrekvenciájú szabadlengés-alakja van, nemegyes csak a lengésalak tüzetes vizsgálatával különböztethető meg egymástól. Ezt a szerkezet összetettsége magyarázza. Az ívhidaknál a pályaszerkezet egy félhullámú lengéseihez az ívek számottevő hosszváltozása tartozik, míg a két félhullámú lengések az ívek hosszváltozása nélkül is ki tudnak alakulni. Emiatt a pályaszerkezet félhullámú lejjelével jellemzett lengésalakok nem tartozhatnak a domináns lengésalakok közé. A számítások valóban azt mutatták, hogy a legalacsonyabb sajátfrekvenciához tartozó lengésalak a pályaszerkezet két félhullámú függőleges eltolódásával jellemzett „tisztá hajlítási lengés” (8.a ábra). A további sajátlengés-alakok egy része szintén hajlítási lengés, de már a második „tisztá hajlítási lengés” előtt jelentkeznek a szintén két félhullámú, de összetett, az ívek vízszintes



8. ábra • Sajátlengésalakok (a) 1, (b) 2



9. ábra • Sajátlengésalakok (a) 3, (b) 4

elmozdulásainak és a pályaszerkezet elcsavarodásainak kombinációjával jellemzett lengésalak. Ez alapvetően a híd súlypontjának és rugalmassági középpontjának eltérő magasságából adódik. A függőleges hajlító lengések azért léphetnek fel tisztán, mert mindkét pont a híd teljes keresztmetszetének szimmetriatengelyében van, a kombinált lengésalakok pedig azért, mert az említett pontokhoz kötődő hatások különböző magasságban működnek.

A híd aerodinamikai stabilitásának vizsgálata szempontjából fontos azoknak a közeli sajátfrekvenciákhoz tartozó lengésalakoknak az ismerete, amelyekhez a pályaszerkezet aerodinamikailag kombinálódó, öngerjesztett hajlító és csavaró lengése (flutter) tartozhat.

Valóban található az első sajátlengésalakok közt ilyenek. Az „első” két félhullámú hajlító lengéshez közeli frekvenciájú „harmadik” lengésalak (9. b ábra) esetén a pályaszerkezet jó közelítéssel két félhullámú csavaró lengést végez. A két lengésalakhoz tartozó sajátfrekvenciák aránya $\varepsilon=1,645$, ami – szerencsére – magasabb a hasonló keresztmetszet-kialakítású gerendahidak problematikus frekvenciaarányánál. Az aerodinamikai kombináció veszélyét vizsgáló modellkísérletek kiinduló adata ezeknek a lengéseknek a sajátfrekvencia-aránya volt.

A lengésvizsgálatban felhasznált kétféle modell eredményei a lengési módusok többségében meggyőző egyezést mutattak. Ez lehe-

tőséget adott arra, hogy a hídtengely-irányú földrengésterhek vizsgálatában – néhány egyszerűsítéssel – ezt a rúdmodellt alkalmazzuk. A rúdmodell pályaszerkezetének vízszintes síkú lengései azonban lényegesen nagyobbak voltak, mint a felületszerkezet-modellé. Ez azt mutatta, hogy a feszültségek ellenőrzéséhez igazított tartórácsmodell nem képes egyszerűsíteni arra is, hogy a pályalemez tárcsamerevségének hatását a felületszerkezet-modellhez hasonlóan tükrözze. Ezért a szélteher *time-history* módszerrel történt vizsgálatához egy többletmerevítéssel módosított rúdszerkezeti modellt kellett alkalmazni. Ezt a vizsgálatot a tervező végezte el a SOFiStiK program szélmoduljának támogatásával.

Az aerodinamikai vizsgálat

A hídszerkezetek szélhatásból adódó teherhánya, különösen pedig a dinamikus terhelést jelentő teherhányad a támaszköz növekedésével folyamatosan növekszik. Az aerodinamikai hatások a pályaszerkezet belebegését és a kábelek lengését okozhatják. A belebegés közvetlenül veszélyezteti a híd állékonyságát, a kábelmozgás gyors anyagfáradást idézhet elő. A szerkezetre ható szélteher nagyságát és rezgőkeltő hatását jelentősen befolyásolják a szerkezeti kialakítás (elsősorban keresztmetszeti alak) finom részletei. A hídszerkezet aerodinamikai viselkedése ezért csak részletes egyedi vizsgálattal tisztázható (Hegedűs, 2005). Ilyen vizsgálat szélcsatornakíséreltetel vagy az áramlás numerikus szimulációjával végezhető.

A mederhíd aerodinamikai vizsgálatát a BME Áramlástan Tanszékén végeztük. Mind szélcsatornakíséreltetekre, mind numerikus vizsgálatra sor került.

Az összetett alakú merevítő tartós ívhídra ható (dinamikus) szélteher alábbi három gerjesztő hatása igényelt részletes vizsgálatot:

- a lökészerű szélesség-változásokhoz tartozó ún. turbulenciagerjesztés,
- a pályaszerkezet örvénygerjesztése,
- a pályaszerkezet önvezérelt lengései.

A felsorolt vizsgálatok az alábbi részfeladatok elvégzését igénylik:

- a pályaszerkezetre és az ívekre ható szélteher eltoló, emelő és elforgató keresztmetszeti eredőinek meghatározása a szélirány függvényében,
- az örvényelválások szélességtől függő frekvenciájának és az örvények által létrehozott felhajtóerő-ingadozás amplitúdójának meghatározása,
- a belebegést okozó kritikus szélesség meghatározása.

A szélcsatorna-vizsgálatok

Az áramlástan vizsgálatokat az Áramlástan Tanszék Kármán Tódor Szélcsatorna Laboratóriumában végeztük el a laboratórium vízszintes, recirkulációs rendszerű szélcsatornájában (Goricsán et al., 2005).

Az áramlástan és rugalmassági problémák együttes modellezésének összetettsége miatt ilyen méretű hidaknál nem az egész hídszerkezet rugalmas (aeroelasztikus) fizikai modelljét vizsgálják, hanem a híd egy adott hosszúságú szakaszának modelljét, melynek alakja és mozgásai a valóságos híd dinamikai viselkedését helyesen modellezi. Ez a szerkezetrész esetünkben a pályaszerkezet. Ennek egy reprezentatív szakaszát egy ún. szekciómodell képviselte a vizsgálatban.

Az aprólékos munkával kidolgozott 1:70 léptékű, alumíniumból készült szekciómodell részletesen követi a hídkeresztmetszet geometriáját (10. ábra). A híd tengelyére merőleges síkban ható erőt és nyomatékot négy, a vízszintes erőt a modell két oldalán egy-egy vízszintesen elhelyezett erőmérő cellával mértük

(11. ábra). A nyomásingadozások regisztrálására a modell áramlással párhuzamos szimmetriasíkja közelében, attól egyenlő távolságban felvett két síkban összesen hetvenöt nyomásmérési helyet alakítottunk ki. A modellt kis, 0,5 % turbulenciafokú és az atmoszférikus áramlásnak megfelelő nagyobb (a szakirodalom alapján 5 %) turbulenciájú áramlásban vizsgáltuk. A rögzített állapotban végzett mérésekkel meghatároztuk a széltelér keresztmetszeti eredőit és a pályaszerkezetre ható szélnyomás-eloszlást. A modell forgatásával kimértük a szélirány és az erő- és nyomatéki tényezők kapcsolatát leíró függvény néhány jellemző értékpárját. Az erő- és nyomatéki tényezőket $0, \pm 2^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$ megfúvási szögnél határoztuk meg, két különböző turbulenciafok esetén, kerékpárút modellezésével és anélkül. A 75 mérési pontban valamennyi változatnál mértük az időbeni átlagnyomást és a nyomásin-

gadozást. A modell mögött elhelyezett hődrót-anemométerrel mértük a hídról leúszó örvények okozta sebességingadozást. A nyomásingadozás-mérések alapján meghatároztuk az intenzitás hely szerinti változását, a hídlengést gerjesztő nyomásingadozások frekvenciáját és amplitúdóját.

Mivel a híd keresztmetszete az áramlási határreteg leválását előidéző „éles” elemekből áll, a szekciómodell és a tényleges szerkezet körüli áramlás a Reynolds-féle szám különbözősége ellenére hasonló. Ezért a rögzített helyzetű szekciómodellen mért nyomásingadozások közvetlenül felhasználhatók a pályaszerkezetet érő örvénygerjesztés vizsgálatánál.

Az aeroelasztikus hatások vizsgálatához a szekciómodell rugalmas felfüggesztésével biztosítani kellett a modell két szabadságú szabadlengését. A valóságos híd nem modellezett részének hatását modellező rugalmas felfüg-

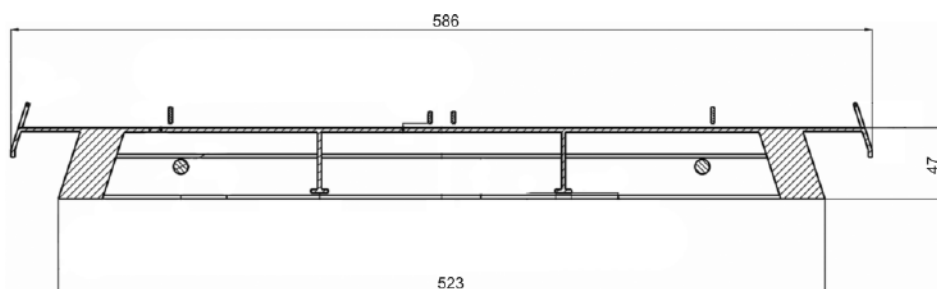
gesztést lemezzugókkal oldottuk meg, ezek a translációs lengést és a modell hossztengele körüli forgó lengést biztosították. A két lengés frekvenciájának arányát a felfüggesztés torziós lengés frekvenciáját befolyásoló távolságának változtatásával állítottuk be. Ily módon el lehetett érni, hogy ez az arány azonos legyen a pályaszerkezet hajlító és csavaró lengésével bekövetkező aeroelasztikus stabilitásvesztésben kombinálódó két lengésalak sajátfrekvenciájának arányával. A szekciómodell mozgását a modell felső lapjának négy sarkában elhelyezett gyorsulásérzékelők mérték. Ez a modell a modelltörvényekből adódó túlhatározottság miatt nem volt alkalmas a hídra ható szél kritikus értékének a közvetlen kimérésére, de lehetőséget adott, hogy kísérleti úton meghatározzuk a zérus vastagságú sík keresztmetszethez tartozó elméleti kritikus sebesség és a keresztmetszeti kialakítás által módosított kritikus sebesség hányadosát.

A szélcsatorna-vizsgálatot kis áramlási sebességeknél (2 m/s) kezdtük, majd lépcsősen növeltük a sebességet. Ennek hatására a mo-

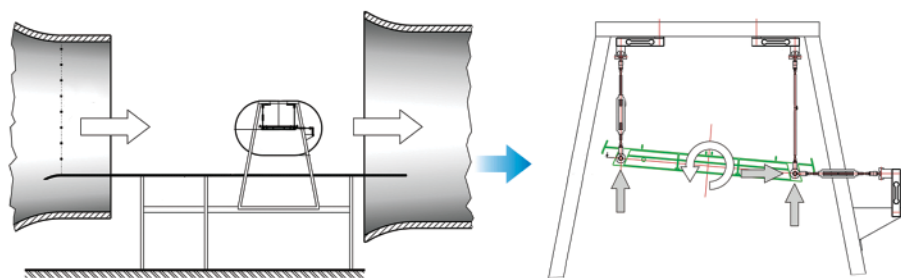
dell több alkalommal nagy amplitúdójú flutter lengésbe kezdett (12. ábra). A különböző sebességeknél felvett rezgéseképek és spektrumok azt mutatták, hogy 9,9 m/s érték tekinthető a modell kritikus sebességének. Ezt összehasonlítva a szakirodalomból ismert alapmegoldással, a kritikus sebességek hányadosa $\eta = v_{krit} / v_{kritsz} = 0,545$ értékre adódott. Az elterjedten alkalmazott Klöppel–Thiele-féle szakirodalmi ajánlás a vizsgált hídalak esetén erre a hányadosra – a híd magasságának a szélességéhez viszonyított aránya, illetve a csavaró és hajlító lengések aránya alapján – hozzávetőleg $\eta = 0,58$ értéket javasol. A kísérletek eredményeiből megállapítható, hogy ez a fél-empirikus módszer alkalmas az adott hídnál a kritikus sebesség meghatározására.

Numerikus vizsgálat

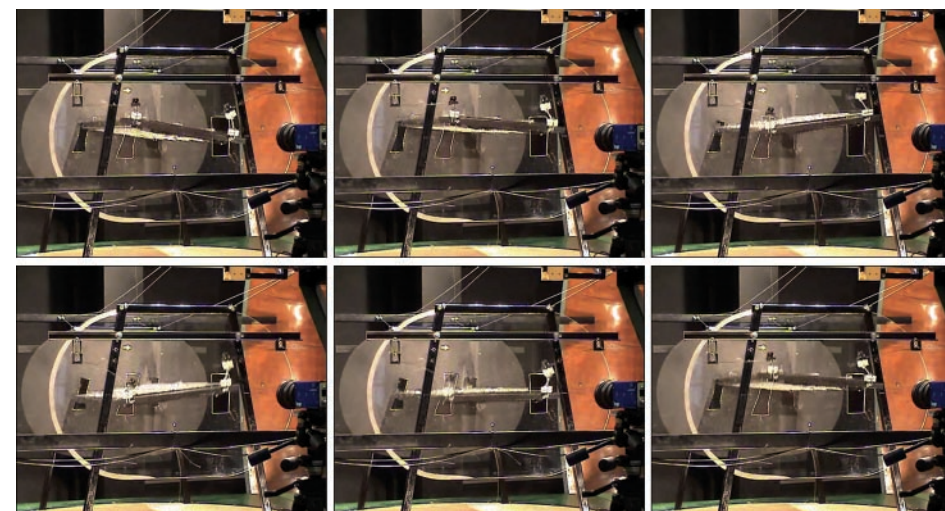
A fent ismertetett mérési program mellett a Fluent 6.1.22 szoftverrel elvégeztük a híd körüli áramlás nagyörvény (large eddy) szimulációját is. Ez a számítás lehetőséget adott arra, hogy feltárjuk a híd körüli áramlás részleteit,



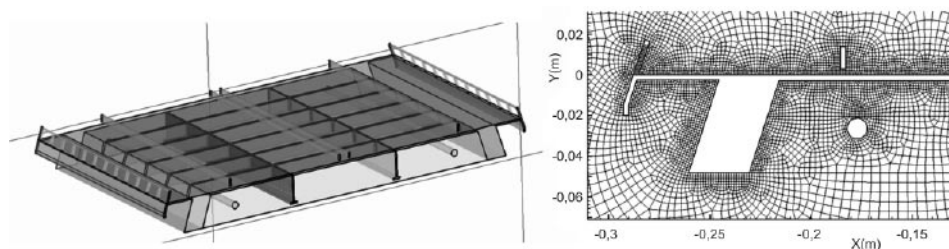
10. ábra • Szélcsatorna-szekciómodell



11. ábra • Szélcsatorna kísérleti elrendezés



12. ábra • Szélcsatorna-szekciómodell lengése



13. ábra • Numerikus szekciómodell

a periodikus lengéseket okozó örvények keletkezésének helyét és mozgásuk jellemzőit (Lohász – Lajos, 2005). A numerikus modell kialakítása során a szélsatorna-kísérletekben használt 1:70 léptékű szekciómodell egy „szeletét” képeztük le, a számítási tartományt a körüláramlásokra elfogadott irányelvek alap-

ján választottuk meg (13. ábra). A számítást egyenletes sebességmegoszlással indítva, adott időlépésekben hajtottuk végre. A szimuláció jelentős számítógépi háttérrel követelt (tíz perc „real time” hosszúságú folyamathoz háromprocesszoros párhuzamos számítás segítségével három hét futási idő). A numerikus szimulá-

ció eredményeit a mérési eredményekkel összevetettük. Megállapítottuk: (a.) a hídmodell felső részén a megfúvási sebesség csak kisebb mértékben befolyásolja az alakító tényező értékét, a számítási eredmények igen jól közelítik a mért értékeket, beleértve a szalagkorlátok által okozott helyi nyomásváltozásokat is, (b.) a híd alsó részének mintegy negyedén a számított és a mért értékek között nagyobb különbségek adódtak. Mindkét kerékpárút alatt és a főtartók alsó felületén is igen jó egyezést tapasztaltunk. Jó egyezést adott a mérésekkel a numerikus szimuláció a hídmodellről leváló örvények frekvenciája és amplitúdója tekintetében is. Összességében megállapítottuk, hogy az áramlás nagy örvény módszerrel végzett numerikus szimulációjával a jelenség megfelelő pontossággal elemezhető.

A numerikus modell alkalmazásával további szimulációkat hajtottunk végre, amelyekkel a szerkezeti kialakítás okozta áramlási viszonyok – a mérési vizsgálatokon túlmenően is – vizsgálhatók voltak (14. ábra). A numerikus szimuláció eredményeként kapott „filmekből” kitűnt, hogy a híd alsó része alatt viszonylag nagy, de nem nagyon intenzív örvények keletkeznek, amelyek közel periodikusan mozognak, de a modell alsó felületétől viszonylag nagy távolságban vannak, így a nyomás változásából származó periodikusan ingadozó erő amplitúdója nem túl jelentős.

Földréngésvizsgálat

A földréngésvizsgálatot a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén és a Tartószerkezeti és Szilárdságtani Tanszékén végeztük (Vigh et al., 2006a). A híd tervezésének idején Magyarországon földréngésvizsgálatra vonatkozó szabvány nem volt érvényben. Az útügyi előírás úgy rendelkezett, hogy a földréngés hatását „a szakma elismert szabályai szerint figyelembe

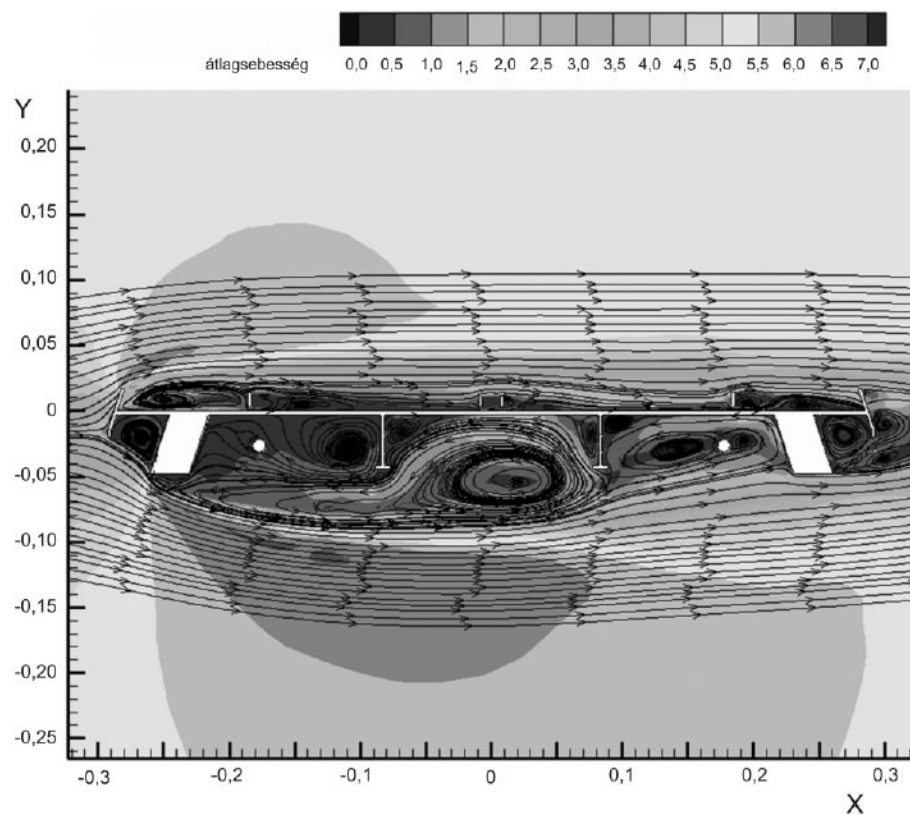
kell venni”. Ezért a vonatkozó Eurocode 8 aktuális – még hivatalosan nem kiadott – változatának irányelveit követtük a vizsgálatok végrehajtása során. Az Eurocode-hoz az ún. *Nemzeti Melléklet* sem állt rendelkezésre, amely többek között a figyelembe veendő talajgyorsulásról intézkedik. Ezért a korábban kiadott *Nemzeti Alkalmazási Dokumentum*-ban adott értékeket vettük figyelembe. A hazai szeizmikus kutatások szerint, a Pentele híd helyén várható földrengés talajgyorsulása 0,08 g, azaz a nehézségi gyorsulás 8 %-a.

A teljes hídszerkezet – a két ártéri hídszakasz és a mederhíd – földrengéssel szembeni biztonságát ezen alpagyorsulás feltételezésével kellett meghatározni.

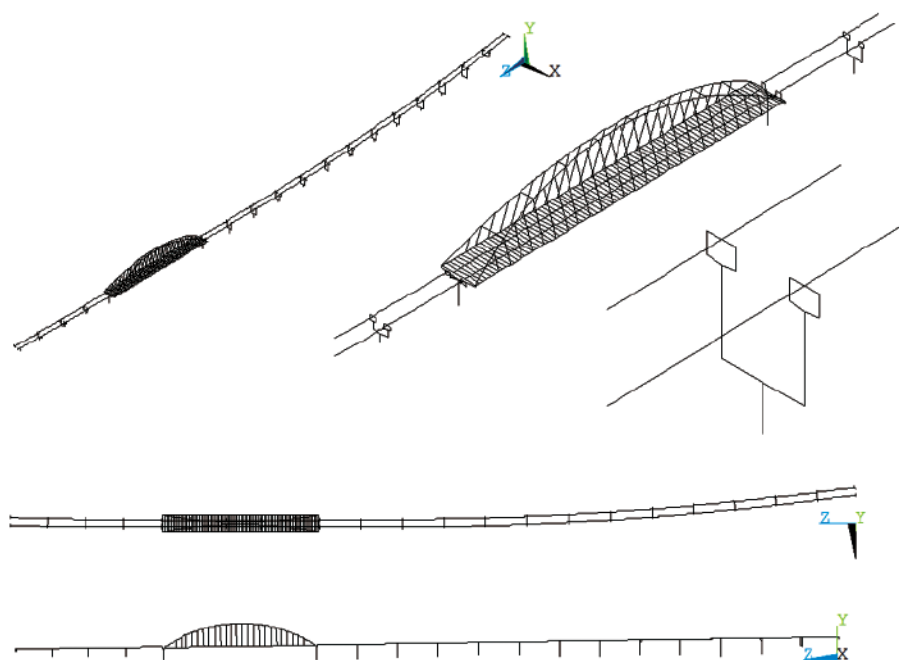
A földréngésvizsgálat módszere és kiindulási adatai

A földréngésszámítás a válaszspektrum analízisre épül, amelynek lényege, hogy a szerkezet igénybevételeit csak a domináns (jellemző) rezgésalakokban határozzák meg, és a méretezést ezen igénybevételek megfelelő összegzésével számítják. A méretezéshez szükséges legfontosabb adatok a jellemző maximális talajgyorsulás és az ún. válaszspektrumgörbe.

A hidak esetleges képlékenyedését úgy lehet figyelembe venni, hogy a földréngési teher értékét az ún. viselkedési tényezővel redukáljuk. A hidak tervezését vagy „duktilis”, vagy „korlátozottan duktilis/lényegében rugalmas” alapon kell elvégezni. Az előbbi esetben a tervezés során a keresztmetszeteket úgy kell kialakítani, hogy a képlékeny csuklók a feltételezett helyeken alakuljanak ki. Jelen híd tervezése rugalmas méretezési elv alapján történt, tehát nem vizsgáltuk a képlékeny csuklók kialakulását, ezért a „korlátozottan duktilis/lényegében rugalmas” számítás szabad alkalmazni. Ebben az esetben a visel-



14. ábra • Numerikus szekciómodell-szimuláció eredményei



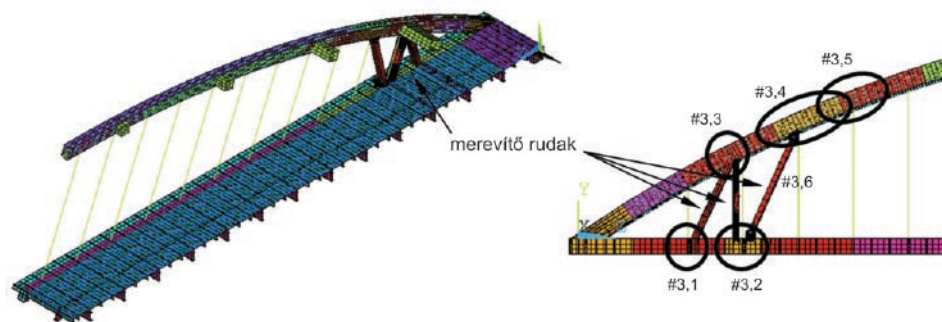
15. ábra • Földrengésvizsgálati hídmodell

kedési tényező maximális értéke 1,5, ezt vettük figyelembe a számításban.

Az alapgyorsulás értékét a híd fontossági osztálya függvényében egy 0,85 és 1,3 között változó tényezővel kell megszorozni. A Duna magyarországi szakaszán jelenleg nincs egyetlen híd sem, amelyet földrengésre méreteztek volna, ezért a Pentele híd fontosságát „átlag

felettinek” tekintettük, és a talajgyorsulást a $\gamma_1 = 1,3$ fontossági tényezővel megszoroztuk.

A válaszspektrum görbéi elsősorban a talajosztálytól függenek. Az Eurocode vízszintes rezgéshez minden talajosztályra kétféle típusú válaszspektrumgörbét ad. A vizsgálat során – a biztonság javára tett közelítésként – ezek burkolóit használtuk.



16. ábra • Globális végelemes modell – szerelési állapot

A földrengésvizsgálat végrehajtása, eredményeinek értékelése

A híd térbeli rúdmodellel vizsgáltuk az Ansys végeelemes program segítségével. A párhuzamosan futó két ártéri híd két elkülönülő gerendasorral modelleztük (15. ábra). Az ártéri hidak folytatólagos többtámaszú tartók, amelyek azonban kölcsönhatásban állnak egymással az alul összefogott pillérek miatt, és a közös mederpilléreken keresztül össze vannak kötve a mederhíddal is. Ez szűkösessé tette a teljes hídsorozat együttes vizsgálatát. A konvergenciavizsgálat szerint hozzávetőlegesen 3400 csomópont alkalmazása kielégítő pontosságú eredményt szolgáltat.

A számítások szerint a globális teherviselő elemek méretezésében, a függőleges irányú földrengéskomponens szerepe elhanyagolható, a keresztirányú földrengéskomponens szerepe kicsi de a tengelyirányú (vízszintes) földrengéskomponensnek domináns hatása van (Vigh et al., 2006b).

A földrengés figyelembevételével a szerkezetek fő igénybevételei (és a keresztirányú sarureakciók) csak kis mértékben (20–30 %kal) adódnak nagyobbra, mint a gyakori tehercsoportosítások során számításba vett terhekből eredők. A hosszirányú sarukon viszont a földrengési teher esetén a földrengésteher figyelembevétele nélkül számított sarureakció két-háromszorosa is ébred, amely természetesen jelentős feszültségnövekedést jelent a saru környezetében is.

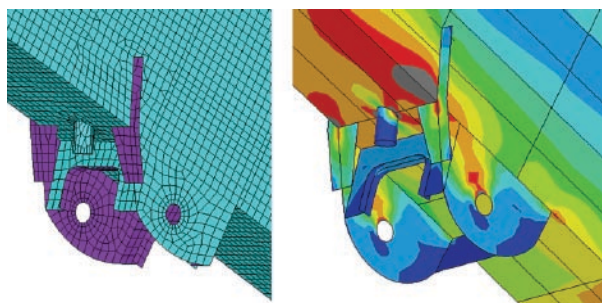
Globális és lokális stabilitásvizsgálat a beúsztatás állapotában

A mederhíd szerelését a parton végezték, majd nagy teherbírású bárkák segítségével úszatták be a hídpillérek közé. Ebben az állapotban a bárkák nem a végleges támaszain, hanem a

merevítő tartók közbenső szakaszain támasztották alá a hidat. A teherviselésbe feltétlenül be kellett vonni az ívszerkezetet. Ezt ideiglenes összekötő rudak segítségével lehetett elérni, ami a végleges állapottól lényegesen eltérő erőjátékot eredményezett az egész szerkezeten (Horváth – Nagy, 2008). Különösen kedvezőtlen a változás az ideiglenes erőbevezetések által érintett gerenda- és ívszakaszokon, ahol csaknem az úsztatott összsúly (87 000 kN) egynegyede adódik át. Az igénybevételek elviseléséhez itt erőteljes helyi megerősítésre volt szükség, továbbá merevítő bordázatot kellett kialakítani az acéllemezekből összetett tartószerkezetek lokális horpadásainak megállításához. Ezek megtervezéséhez nagy pontosságú számítógépi modelleken alapuló vizsgálatokkal kellett végrehajtani. A vizsgálatokat a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén végeztük (Dunai, 2006).

A végeelemes modell és igénybevétel-számítás

Az úsztatott hídszerkezet globális vizsgálatára alkalmazott felületszerkezeti végeelemes modell (16. ábra) megfelelő pontossággal tudta követni a szerelési terhek teljes szerkezetre kifejtett hatását, de az erőbevezetések lokális hatásának vizsgálatára a modellt pontosítani kellett. Ennek érdekében a leginkább érintett öt szerkezeti részletre a globális modelltől származtatott nagyobb felbontású lokális modellt dolgoztunk ki az Ansys végeelemes program alkalmazásával. A lokális modelleket a globális modellen végrehajtott vizsgálat alapján felvett kinematikai terhekkel illesztettük a globális modellhez. A 17.a ábrán az ív és az ideiglenes összekötő rúd csatlakozásának lokális modellje látható. A 17.b ábra a lokális modellel meghatározott, jelentős csúcsokat tartalmazó feszültségeloszlásokat mutatja.

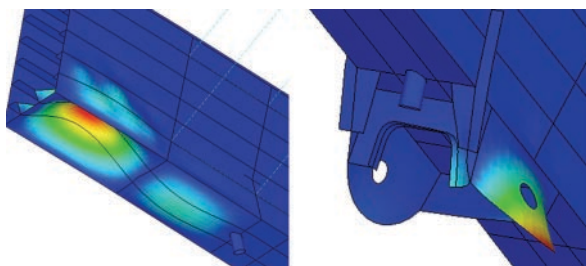


17. ábra • Ívcsomópont (a.) lokális végelemes modellje, (b.) feszültségeloszlása

Stabilitásvizsgálatok

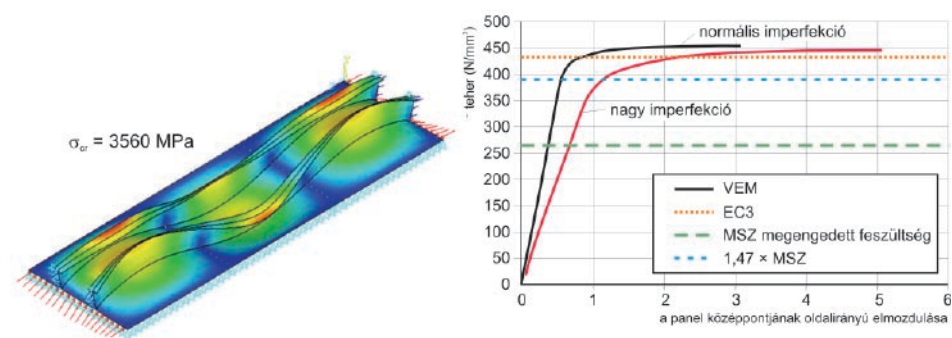
A szerkezet globális stabilitási vizsgálata szerint az ívkihajlás az úsztatási állapotban nem okoz problémát, viszont az ívek és merevítő tartók keresztmetszeteit alkotó lemezek horpadási teherbírása az erőbevezetések környezetében nem elegendő.

A lokális merevítéshez alkalmazott merevítő elemek stabilitásának ellenőrzése a szabálytalan alak és az összetett feszültségeloszlás következtében egyedi vizsgálatokat igényelt. A vizsgálatokat nagy pontosságú végelemes modelleken végzett numerikus instabilitási analízis kritikus feszültségei és az imperfekciók szabványos – MSZ és Eurocode – figyelembe vételével végeztük el (18. ábra). Az eredmények azt mutatták, hogy bizonyos mértékadó merevített lemezmezők kihasználtsága a megerősítés ellenére is igen magas, a 100 %-ot is meghaladó. Az alkalmazott eljárások



18. ábra • Lemezmezők instabilitási analízise

rárok verifikációjára, illetve a mértékadó lemezmezők horpadási teherbírásának megnyugtató megállapítására hat különböző geometriájú és kialakítású merevített lemezmezőt számítógépi szimulációval vizsgáltunk meg, azaz ún. virtuális kísérleteket hajtottunk végre. A vizsgálatok eredményeként kapott nemlineáris nyomóerő – elmozdulás diagramokból megállapítható volt a szerkezet teherbírás tartáléka és imperfekció-érzékenysége (19. ábra). A virtuális kísérletek azt is megmutatták, hogy mekkora a különböző szabványos eljárások biztonsági szintje. Az átfogó vizsgálatok igazolták, hogy a merevített lemezmezők a szerelési terhek hatására fellépő nagyintenzitású és összetett eloszlású igénybevételeket megfelelő biztonsággal, maradó deformációk nélkül fel tudják venni. Amikor a mederhidat a bárkák leemelték ideiglenes támaszairól, a merevítő elemek sértetlensége alátámasztotta a számításokat.



19. ábra • Merevített lemezmező virtuális kísérleti vizsgálata

Kulcsszavak: függesztett ívhíd, modellkísérlet, lengés, aerodinamika, földrendési ellenállás

IRODALOM

- Dunai László (2006): *Advanced Stability Analysis and Design of a New Danube Arch Bridge*. 6th European Solid Mechanics Conference; Budapest, Hungary, Extended Abstract, p. 2, CD
- Goricán István – Balczó M. – Lajos T. (2005): *A dunaújvárosi Duna-híd aerodinamikai vizsgálata: szélcsatorna-kísérlet*. BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos Közleményei, Budapest, 65–76.
- Hegedűs István (2005): *Nagyátaszakozú ívhidak tervezésének a szélterheléssel kapcsolatos kérdései*. BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos Közleményei, Budapest, 41–56.
- Hegedűs István – Kovács Imre (2007): *A szél dinamikus hatásának vizsgálata*. Elhangzott az MTA-n, 2007. május 10-én, a *Híd szerkezetek (A tudománytól a megvalósulásig)* című tudományos ülésen.
- Horváth Adrián – Nagy Zsolt (2008): *A dunaújvárosi Pentele híd tervezése*. Magyar Tudomány. 4
- Horváth Adrián – Dunai L. – Nagy Zs. (2006): *Dunaújváros Danube Bridge: Construction, Design and Research*. Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE). 16, 1, 31–35.
- Joó Attila László – Hegedűs István (2005): *A dunaújvárosi Duna-híd lengésvizsgálata*. BME Hidak és Szerkezetek Tsz. Tud. Közleményei. Bp., 57–64.
- Joó Attila László – Dunai László (2005): *Strength of an Arch Bridge Model: Experiment and Design Methods*. In: Hoffmeister, Benno – Hechler, Oliver (eds.): *Proceedings of the 4th European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel '05)*. Maastricht, The Netherlands. Druck und Verlagshaus Mainz Publisher, Vol. B, 4.7-49–4.7-56.
- Joó Attila László – Dunai L. – Kálló M. – Kaltenbach L. – Köröndi L. (2005): *Experimental Analysis of a Nielsen-type Bridge Model*. Materials Engineering, 12, 1, 1–6.
- Lohász Máté Márton – Lajos Tamás (2005): *Híd metszet áramlástanai vizsgálata nagy-örvény szimulációval*. BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos Közleményei. Budapest, 77–86.
- Vigh László Gergely – Dunai L. – Kollár L. (2006a): *Numerical and Design Considerations of Earthquake Resistant Design of two Danube Bridges*. 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES 2006, A Joint Event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC), Geneva, Switzerland, ID 1420 /1–10.
- Vigh László Gergely – Dunai L. – Kollár L. (2006b): *Experiences on the Earthquake Resistant Design of Two Danube Bridges*. IABSE Symposium, Budapest, Hungary, Report, Vol. 92, IABSE Publisher, 456–457, CD 8 pages