



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki kar
Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék

Híd pályák kísérleti és numerikus alapú aerodinamikai stabilitásvizsgálata

Az értekezés tézisei

Készítette:

Szabó Gergely

Pont-Terv Zrt.

Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék

Tudományos vezető:

Dr. Györgyi József

Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék

Külső szakértő:

Dr. Kristóf Gergely

Áramlástan Tanszék

Budapest, 2013

1. A kutatás háttere, célkitűzések

Az értekezésemben hídpályák aerodinamikai stabilitásának vizsgálatával foglalkozom. A kutatásban szélcsatorna kísérleteket és numerikus szimulációkat alkalmaztam. A széldinamikai jelenségek numerikus vizsgálatát a CFD ("*Computational Fluid Dynamics*") szoftverek fejlődése és a számítógépek teljesítményének növekedése teszi lehetővé.

Hídszerkezetek aerodinamikai vizsgálatára olyan esetekben lehet szükség, ahol a teljes szerkezet vagy annak egyes elemei karcsúak, így szélterheléssel szemben érzékennyé válnak. Nagyfeszítávolságú hidak esetében a hídpálya belebegése jelenti a legveszélyesebb instabilitási formát, ezért ennek ellenőrzése ilyen szerkezeteknél elsődleges tervezési feladattá válik. A legelterjedtebb megközelítés hídpályák belebegés vizsgálatához a szélcsatorna kísérlet. Általános esetekben szekció modelleket készítenek, amelyek a hídpályának csak egy szeletét reprezentálják. Speciális esetekben (nagy feszítávolság, összetett lengésalakok, a szélterhelés erősen háromdimenziós jellege) teljes aeroelasztikus modelleket készítenek, amelyek azonban rendkívül drágák, továbbá alkalmazásuk az áramlástan és mechanikai modelltörvények együttes betartását igényli, ami csak korlátozottan valósítható meg.

A CFD segítségével lehetőség nyílik a belebegés numerikus megoldására, melyre hidaknál kizárólag kétdimenziós esetben találunk példákat. Ez a megközelítés a szekció szélcsatorna modellezés virtuális megfelelőjének tekinthető. Az irodalmi adatok tanulmányozásából kiderül, hogy a kétdimenziós modellek megbízhatóságát még nagyszámú szimulációval és ellenőrző szélcsatorna kísérlettel kell növelni annak érdekében, hogy a hídtervezési gyakorlat elfogadott eszközeként tekinthessünk rá.

Az irodalomban rendelkezésre álló módszerek és eredmények tanulmányozása alapján két fő kutatási irányt tartottunk érdekesnek és a gyakorlat számára fontosnak. Az egyik fő irányvonal a kétdimenziós áramlási szimulációkkal kapcsolatos kutatások, ahol az irodalomban már bemutatott módszerek alkalmazása, és adott esetben továbbfejlesztése a cél. Ettől a kutatási egységtől azt reméljük, hogy a gyakorlat számára gyors eredményeket szolgáltató módszert tudunk kidolgozni. A másik fő kutatási irány a háromdimenziós numerikus megközelítés, amely a teljes aeroelasztikus szélcsatorna kísérletek virtuális megfelelőjének tekinthető. Ilyen szimulációkat hidak esetében nem találtunk, ezért más tudományterületekről gyűjtöttünk információkat. Jól láthatóan elsősorban a repüléstechnikában találunk ilyen számításokat, továbbá néhány speciális alkalmazásban (pl. bio-mechanikai feladatok). Ebben a kutatási egységben a háromdimenziós numerikus megközelítés kidolgozását tűztük ki célul hídpályák aerodinamikai stabilitásvizsgálatához.

A doktori értekezés főbb célkitűzéseit az alábbiakban foglaltam össze:

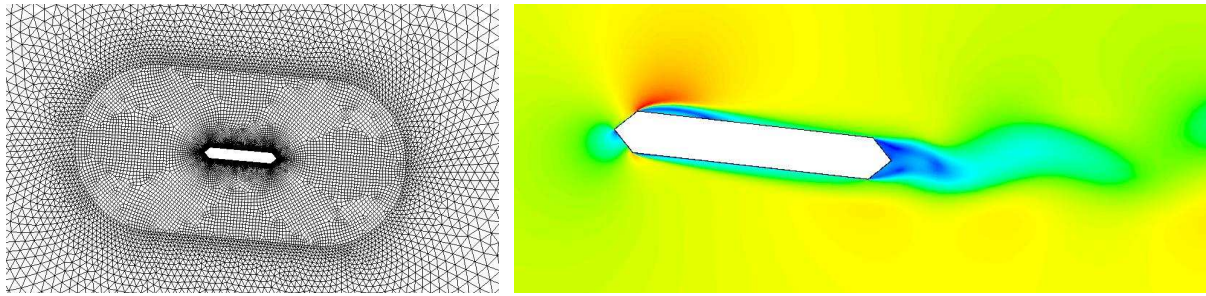
- A széldinamikai számításokhoz a szerkezetdinamikai módszerek mellett a numerikus áramlástan szimulációk alkalmazása is szükséges. A belebegés numerikus elemzése előtt fix testek aerodinamikai vizsgálatával terveztük tesztelni a CFD szimulációkat. Fontosnak tartottuk a CFD pontosságát és megbízhatóságát az építőmérnöki feladatok szempontjából megítélni. A tesztelést az aerodinamikai feladatok alapeseteinek tekinthető kör és téglalap keresztmetszetek körüli áramlás vizsgálatával terveztük elvégezni.
- A fix testek aerodinamikai számításainál szerzett tapasztalatok alapján át lehet térni a mozgó testek aerodinamikájára. Az egyik lehetőségként a kapcsolt feladatokat (FSI, "*Fluid Structure Interaction*") terveztük megismerni. Ehhez az irodalom alapján a megfelelő módszert kell kiválasztani, és egyszerű teszteseteken ellenőrizni.

- A kapcsolt eljárások ismeretében idealizált és valós híd keresztmetszetek belebegés vizsgálatát terveztük elvégezni. A numerikus számításához a direkt és az indirekt módszereket is alkalmazni kívántuk. A numerikus megoldás részletes ellenőrzésére egy szekció modell mérési programot terveztünk végrehajtani. Különös figyelmet kívántunk fordítani a kapcsolt szimulációk egyik fontos elemére, a dinamikus CFD hálók kezelésére. Bár a szoftverek beépített dinamikus hálóval rendelkeznek, célul tűztük ki a dinamikus háló saját programmal történő vezérlését, amivel a csomópontok mindig a kívánt pozícióba kerülnek, így minimalizálható a cellatorzulás.
- A szekció modellek aerodinamikai vizsgálatát követően a három-dimenziós megközelítés megismerése és alkalmazása a cél. Szükségesnek tartottuk az eljárás összes aspektusának, sarkalatos pontjának megismerését, elemzését. A célszoftver az Ansys-CFX és az Ansys mechanical classic, amelyeket a program beépített moduljával lehet kapcsolni. Ezzel a megközelítéssel csak fekete doboz használatára nyílik lehetőség, emiatt célul tűztük ki egy alternatív kapcsolt szimuláció elvégzését is, amihez a Fluent szoftvert terveztük használni, UDF ("*User Defined Functions*", felhasználói programok) segítségével.
- A kapcsolt szimulációk kutatása mellett célunk volt egy új módszer kidolgozása is, amellyel ötvözhető a belebegési együtthatók módszerének és a háromdimenziós CFD szimulációknak az előnyei. A direkt és az indirekt módszerek ellenőrzésére egy aeroelasztikus szélcsatorna modell építését és mérését terveztük elvégezni.
- A kidolgozott új eljárásokat megépült hídszerkezeteken terveztük tesztelni.

2. A kutatási program felépítése

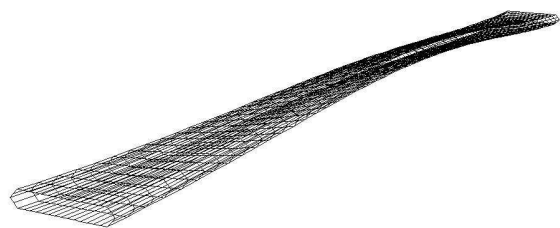
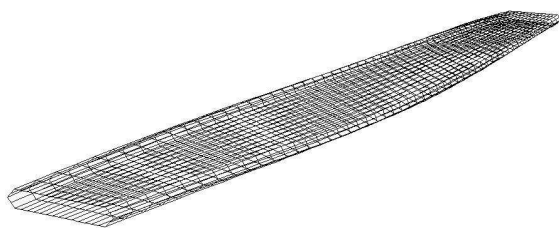
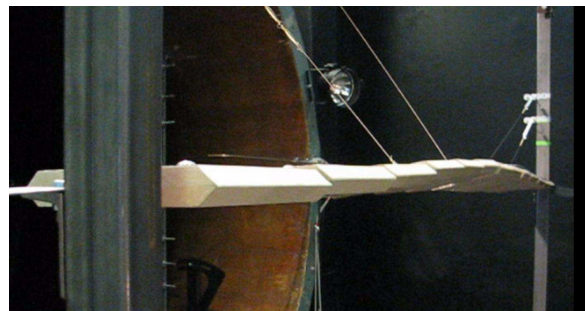
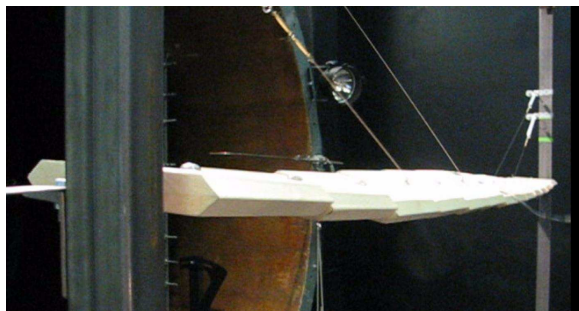
Az értekezés célkitűzéseit figyelembe véve felépítettük a kutatási programot. A CFD megismeréséhez kör és téglalap alakú testek körüli áramlási szimuláció végrehajtását tartottuk célszerűnek. A kör esetében a Reynolds-szám hatásának elemzésére több szélsébséget kellett vizsgálni. A téglalagnál a Reynolds-szám hatása kevésbé jelentős, de az oldalarány szerepe fontos. Az összehasonlításra csak az Eurocode ajánlásait vettem alapul, szélcsatorna kísérletek erre a célra nem készültek. Fontos feladat volt a turbulencia modellek és a numerikus hálózás hatásának elemzése.

Következő lépés a CFD szimulációk alkalmazása belebegés vizsgálatához a Fluent programrendszer segítségével. A vizsgálatokat elsőként az áramlásba helyezett mozgó síklap esetére kellett elvégezni, mivel így analitikus eredményekkel lehetett összehasonlítást végezni. A direkt és az indirekt megközelítéseket is alkalmazni kellett a numerikus eljárás megfelelő ellenőrzése végett. A direkt módszer kapcsolt szimulációk kidolgozását és végrehajtását igényli. A kapcsolt eljárások gyakorlati alkalmazása előtt teszt feladatokat kellett megoldani, amivel az időlépés hatását elemezni lehetett. A kapcsolt eljárások (direkt) és a kényszermozgatásos módszer (indirekt) tesztelése után lehetőség nyílik híd keresztmetszetek vizsgálatára. A belebegés numerikus számításakor az áramlási hálónak mozognia kell, ami bizonyos mértékű cellatorzulásokhoz vezet. A torzulás minimalizálására egy speciális hálózási módszer kidolgozása volt szükséges, amivel a teljes számítási időtartam alatt megőrizhető a jó minőségű numerikus háló. A kétdimenziós numerikus áramlási számításokat többféle keresztmetszeti alakra ellenőriztem; megvizsgáltam két idealizált és két valós keresztmetszetet. A belebegés elemzésén túlmenően számítottam a Strouhal-számokat is. A numerikus megoldások ellenőrzése céljából szekció modell méréssorozatot hajtottunk végre, így a mért és a számított kritikus szélsébségeket össze lehetett hasonlítani. Az alábbi bal ábrán az egyik vizsgált (áramvonalas) híd-szekció körüli (elmozdult) numerikus háló látható, jobboldalon pedig az áramképet mutatom be ugyanerre a keresztmetszeti alakra.



A kétdimenziós numerikus belebegés szimulációk tapasztalatait felhasználva háromdimenziós szimulációk kidolgozása is lehetővé válik. Első lépésként az Ansys szoftver moduljait kellett alkalmazni, amelyekkel az áramlási és a szerkezetdinamikai modellek kapcsolása automatikusan történik. Ezután célszerűnek látszott Fluent programmal és C nyelven írt eljárással is elvégezni ugyanezt a szimulációt, amellyel a számítási idő jelentősen csökkenthető, illetve az Ansys által nyújtott "kész" kapcsolt szimuláció is ellenőrizhető. Ebben a megközelítésben az áramlási erőket a kereskedelmi szoftverrel számítottam, a szerkezeti mozgásokat viszont saját programmal számítottam a modálanalízis alkalmazásával. A kétdimenziós CFD szimulációkhoz hasonlóan a háromdimenziós numerikus háló mozgását külön rutinnal vezéreltem.

Az alábbi két ábrán az aeroelasztikus szélcsatorna modell mérése során kialakult belebegési mozgást mutatom be két időpillanatban, 10 m/s szélsébség közelében. Az alsó két képen a pálya mozgása látható, amit a Fluent programmal számítottam.



Alternatív megközelítésként a háromdimenziós CFD szimulációkat és a kényszermozgató eljárás ötvenzni lehetett egy új módszer kidolgozásával. Az új eljárásban a hídpályát a kiválasztott lengésalakok alapján kell mozgatni, és az aerodinamikai erők megfelelő rendezésével bevezetésre kerültek a modális belebegési együtthatók kifejezései. A háromdimenziós technikák ellenőrzésére a teljesen aeroelasztikus szélcsatorna modellt mértük, amellyel részletes összehasonlítást lehetett végezni, meggyőződve az új eljárások megbízhatóságáról. Az értekezésben kidolgozott és ellenőrzött numerikus módszereket Magyarországon megépült hídszerkezeteken lehetett tesztelni, bemutatva ezzel a módszerek gyakorlati alkalmazhatóságát.

3. A kutatás eredményei, tézisek

Az értekezés téziseit az alábbiakban foglalom össze. Az egyes tézisek után röviden utalok az adott tézishoz kapcsolódó vizsgálatokra, amelyek a disszertáció adott fejezeteiben megtalálhatók.

1. tézis

Az irodalomban található megközelítésekhez képest egy kiterjesztett vizsgálatot hajtottam végre, melyben CFD alkalmazásával meghatároztam egy két-szabadságfokú, áramlásba helyezett síklap kritikus belebegési szélsősebességét direkt (kapcsolt szerkezetdinamikai-áramlási szimuláció) és indirekt (belebegési együtthatók, kényszermozgatás) eljárással egyaránt, így a két módszer részletesebb összehasonlítása vált lehetővé. Megállapítottam, hogy a vizsgált paraméterekkel rendelkező síklap esetében - a direkt módszernél - a megfelelő pontosság eléréséhez a nem kapcsolt dinamikai feladatokhoz képest egy nagyságrenddel kisebb időlépés szükséges, ami a releváns (csavaró) lengésalakhoz tartozó periódusidő 1/200-ad része. Kényszermozgatással számítottam a síklap belebegési együtthatóit. Megmutattam, hogy a belebegési együtthatók kevésbé érzékenyek a turbulencia modellek megválasztására, mint a rögzített testek paraméterei. A direkt és az indirekt módszerekkel számított, valamint az analitikus módon meghatározott kritikus szélsőbességek tökéletes egyezést mutattak.

Ebben a kutatási fázisban az alábbi feladatokat végeztem el:

Kvázi-statisztikus (csak támadási szögűtől függő) aerodinamikai erőkkel ellenőriztem az explicit kapcsolási technika pontosságát az időlépés függvényében.

Programot írtam az explicit eljárás tesztelésére, amit a CFD szoftverbe integráltam, így numerikus alapú aerodinamikai erőkkel is végrehajtottam a kapcsolt szimulációt. A numerikus (direkt és indirekt módszerek) és az analitikus eredmények igen jó összhangot mutattak, igazolva ezzel az explicit eljárás alkalmazhatóságát.

Kapcsolódó fejezet: 4.

Kapcsolódó publikáció: [4]

2. tézis

Az irodalomban található - nagy számítási időt igénylő - módszerekhez képest az építőmérnöki gyakorlat számára alkalmas numerikus eljárást dolgoztam ki híd-szekciók aerodinamikai stabilitásvizsgálatához. A módszer kidolgozásához megterveztem és - az Áramlástan Tanszék közreműködésével - végrehajtottam egy többféle híd-szekciót magába foglaló mérési programot, mellyel a vizsgált keresztmetszeti alakok aerodinamikai viselkedését elemeztem. A szélcsatornában szereplő szekciókat CFD segítségével vizsgáltam. Kidolgoztam egy hatékony, három zónából álló CFD hálózást, mellyel minimalizálható a cellatorzulás dinamikus hálók esetében. A szélcsatorna kísérletek eredményeivel validált CFD szimulációk alapján a numerikus paraméterek (turbulencia modellek, időlépés, numerikus háló) megválasztására is javaslatot tettem. A számított kritikus szélsőbességek birtokában megállapítottam, hogy az aerodinamikailag kedvező híd-keresztmetszetek esetében egy jármű alak-módosító hatása kedvezőtlenül befolyásolja az aerodinamikai stabilitást.

Ebben a kutatási fázisban az alábbi feladatokat végeztem el:

A CFD eljárások ellenőrzése céljából numerikus áramlási szimulációt hajtottam végre (rögzített) kör és téglalap keresztmetszetű testek esetében. A számítások során összehasonlítást végeztem az Eurocode ajánlásaival. A kiterjesztett vizsgálatban (kör esetében több Reynolds-szám, téglalap esetében több oldalarány) az irodalomban elsőként alkalmaztam a SAS turbulencia modellt, amely alapján a SAS modell alkalmazása javasolható, mivel a LES modellnél lényegesen kevésbé érzékeny a numerikus hálózás változására, de a Kármán-féle instabil örvényeket számítani tudja.

A kritikus belebegési szélsőségeket meghatároztam direkt (explicit kapcsolt szimuláció) és indirekt (kényszermozgatás) módszerekkel. Megállapítottam, hogy mindkét módszerrel kapott eredmények jó összhangban vannak a mérési eredményekkel, igazolva ezzel az explicit eljárás helyességét és alkalmazhatóságát. A fix esetekkel ellentétben a mozgó és mozgatott híd-szekcióknál a k- ϵ turbulencia modell az építőmérnöki gyakorlat számára elegendő (15%) pontosságot biztosít.

A jármű alak-módosító hatását egy 30 méter széles, 4 méter magas hídpályára, és egy 4 méter magas, 2,5 méter széles kamion vontatmányra végeztem el, két jármű-pozíció esetében (jobb- és baloldali leálló sávokon elhelyezve). A sajátalakok csillapításainak elemzésével megmutattam, hogy a rotációs csillapítás jelentősen lecsökken, továbbá a translációs csillapítás is zérus alá csökken, ami a jármű nélküli esetben mindig pozitív volt.

Kapcsolódó fejezet: 5.

Kapcsolódó publikáció: [6, 15]

3. tézis

Hídszerkezetek aerodinamikai stabilitás vizsgálatához az irodalomban eddig nem található új megközelítést alkalmaztam, amelyben a szerkezet és az áramlás interakcióját háromdimenziós kapcsolt szimulációval vizsgáltam. A számítási eredmények és az aeroelasztikus szélcsatorna kísérletek mérési eredményei jó összhangot mutattak, ezért a módszert javasoltam az aeroelasztikus szélcsatorna modellek kiváltására vagy ellenőrzésére, így speciális műtárgyak numerikus vizsgálata is lehetővé válik. A háromdimenziós megközelítéssel - a szekció modellekhez képest - részletesebben követhető a szerkezet és az áramlás interakciója.

A vizsgálati program az alábbi részfeladatokból állt:

Megterveztem egy teljesen aeroelasztikus szélcsatorna modellt, melyet - az Áramlástan Tanszék közreműködésével - szélcsatornában teszteltem, meghatározva a kritikus szélsőséget. Felépítettem a szélcsatorna modell felületszerkezeti vége-selelemes modelljét. Elkészítettem a modellt körülvevő áramlási tér CFD hálózását. A számítási idő redukálása érdekében a CFD hálót optimalizáltam; elkészítettem egy részletes 2D hálót és egy durva 3D hálót, melyekből számítottam a belebegési együtthatókat. A 3D hálózásnál az áramvonalas keresztmetszet fél vastagságával egyező méretű határreteg cellamérettel még igen jó egyezést mutattak a 2D és a 3D szimulációkhoz tartozó belebegési együtthatók.

Háromdimenziós kapcsolt szimulációt hajtottam végre, és meghatároztam a kritikus szélesebséget, ami jó egyezést mutatott a szélcsatorna kísérletekkel (10%-os eltérés). A számítási idő 8 napot igényelt egy szélterhelési eset vizsgálatához.

A számítási idő csökkentése érdekében programot írtam a modálanalízis alkalmazásával, így a kritikus szélesebség az előző pontban ismertetett eljáráshoz hasonlóan szintén megfelelő pontossággal számítható, lényegesen kisebb számítási idő szükséglettel. Egy szélterhelési eset számítása ezzel a megközelítéssel csak 4 órát igényel.

Kapcsolódó fejezet: 6.

Kapcsolódó publikáció: [14]

4. tézis

Kidolgoztam egy új indirekt eljárást hídpályák aeroelasztikus belebegés vizsgálatához a frekvencia térben, bevezetve a modális belebegési együtthatók fogalmát. A módszer a hídpálya háromdimenziós kényszermozgatásán és a modálanalízis kombinációján alapszik. A javasolt új eljárással megtarthatók az indirekt megközelítések előnyei (kvázi-analitikus eljárás), ugyanakkor a szerkezet és az áramlás háromdimenziós interakcióját figyelembe lehet venni.

A módszer kidolgozása az alábbi lépésekből állt:

Átalakítottam a két-szabadságfokú belebegés vizsgálatához tartozó matematikai összefüggéseket, így előállítva a kvázi-háromdimenziós eljárást, amely - más formában - már megtalálható az irodalomban.

A kvázi-háromdimenziós eljárásban szereplő aerodinamikai erők mátrixát átalakítottam úgy, hogy a benne szereplő elemeket nem a kétdimenziós, hanem a háromdimenziós CFD szimulációkból származtattam.

A kétdimenziós esethez tartozó belebegési együtthatók analógiájára bevezettem a modális belebegési együtthatókat.

A modális belebegési együtthatókkal összefüggésben a 3. tézisben vizsgált aeroelasztikus szélcsatorna modell numerikus áramlási modelljét háromdimenziós kényszermozgatásnak vettem alá, és számítottam a kritikus szélesebséget. A számított érték jó egyezést mutatott a szélcsatorna kísérletek és a kapcsolt szimulációk eredményeivel.

Analitikus módszerrel megmutattam, hogy a megfelelő pontosság eléréséhez - ennél a szerkezetnél - elegendő a mértékadó csavaró és a mértékadó hajlító lengésalak figyelembe vétele, a többi lengésalak elhanyagolható mértékben (1%) módosítja az eredményeket.

Kapcsolódó fejezet: 7.

Kapcsolódó publikáció: [3]

5. tézis

Elvégeztem két Magyarországon megépült hídszerkezet háromdimenziós aerodinamikai elemzését. A Móra Ferenc híd esetében megmutattam, hogy a háromdimenziós és a kvázi-háromdimenziós (fix geometrián végzett) szimulációk eredményei között 80%-os eltérés adódhat örvénygerjesztés vizsgálatakor, ami a háromdimenziós megközelítés fontosságát igazolja. Közelítő eljárást javasoltam a hídpálya háromdimenziós kényszermozgatásával a szerkezeti mozgások áramlási erőkre gyakorolt hatásának becslésére. A szolnoki gyalogoshíd esetében a kvázi-háromdimenziós és a modális belebegési együtthatók módszerével számított kritikus szélességek egymáshoz közeli eredményt adtak. Megmutattam, hogy a vizsgált háromöví rácsos tartós gyalogos ívhídnál egy csavaró lengésalak mellett két hajlító lengésalak is fontos szereppel bír az aerodinamikai stabilitási viselkedésben.

A tézis az alábbi részfeladatokból épült fel:

Felépítettem egy szabadszerelésű konzolos állapotot reprezentáló szerkezet háromdimenziós áramlástanai modelljét, és számítottam az aerodinamikai erőket fix és mozgatott esetben. Elkészítettem a szerkezet egy szegmensét reprezentáló részletes numerikus áramlástanai modellt, és számítottam az aerodinamikai erőket fix és mozgatott esetben.

Összehasonlítottam az aerodinamikai erőket, és megállapítottam, hogy míg fix esetben az eredmények között lényeges eltérések mutatkoznak, addig a mozgatott testen számított eredmények közel kerülnek egymáshoz, amit a lock-in hatással magyaráztam.

Az aerodinamikai erők birtokában számítottam a szerkezet végpontjának elmozdulásait. Megállapítottam, hogy fix esetben a háromdimenziós modellezés 80%-al kisebb elmozdulást ad, mint a kvázi-háromdimenziós megközelítés.

Javasoltam egy közelítő eljárást a szerkezet-áramlás interakciójának becslésére örvénygerjesztés esetében. Az eljárásban a szerkezetet háromdimenziós kényszermozgatásnak vettem alá, és az így kapott aerodinamikai erőkkel számítottam a konzolvégi elmozdulásokat.

Felépítettem a gyalogoshíd aerodinamikai modelljét, és alkalmaztam rá a 4. tézisben kidolgozott modális belebegési együtthatók elméletét. A számított eredmények jó összhangot mutattak a kvázi-háromdimenziós módszerrel, ezzel igazoltam a modális módszer alkalmazhatóságát ipari feladatokhoz is.

A kvázi-háromdimenziós módszerrel megmutattam, hogy a megfelelő pontosság eléréséhez - a kisminta modellel ellentétben - a mértékadó csavaró lengésalak mellett két hajlító lengésalak figyelembe vétele is szükséges.

Kapcsolódó fejezet: 8.

Kapcsolódó publikáció: [2, 5, 16]

Nyitott kérdések, további kutatási lehetőségek

A doktori értekezésemben hidakkal kapcsolatos aerodinamikai jelenségek numerikus megközelítésével foglalkoztam. Az egyik fő irányvonalat a kétdimenziós szimulációk jelentették, amelyekben sikerült javaslatokat adni a főbb paraméterek helyes felvételére a megbízható eredmények elérése érdekében. A kétdimenziós megközelítés további fejlesztése és ellenőrzése mindenképpen ajánlott, például új hídkeresztmetszeti alakok vizsgálatával vagy a (légköri) turbulencia figyelembe vételével.

A háromdimenziós numerikus megközelítésben nagy lehetőségek rejlenek. Alkalmazásával a teljes aeroelasztikus modellek helyettesítésére vagy ellenőrzésére nyílik lehetőség. Ahogyan az a kisminta modell és a szolnoki gyalogoshíd esetében is látszott, a háromdimenziós kapcsolt eljárás, a modális belebegési együtthatók módszere és a kvázi-háromdimenziós megközelítés közel azonos eredményeket adtak. Ennek oka az, hogy a vizsgált esetek nem voltak speciálisak az áramlás-szerkezetdinamika kapcsolatában. Amennyiben figyelembe kívánjuk venni például a (légköri) turbulencia hatását, a kvázi-háromdimenziós modellhez képes a fejlettebb eljárásokkal pontosabb eredményeket várnánk. Ennek ellenőrzésére komolyabb szélcsatorna kutatási programra lenne szükség, mellyel a turbulenciát is figyelembe tudnánk venni. A numerikus megközelítés szempontjából a turbulencia figyelembe vétele nagymértékben megnöveli a számítási igényt, emiatt ehhez komoly számítógépes háttérre lenne szükség. A háromdimenziós numerikus eljárások továbbfejlesztésével speciális műtárgyak részletes és pontos virtuális kísérletére nyílna lehetőség.

Publikációk az értekezés témakörében

Az értekezésemhez kapcsolódó főbb publikációimat az alábbiakban foglalom össze:

Nemzetközi folyóiratcikk:

- [1] Györgyi J., Szabó G.: "Dynamic analysis of wind effect by using the artificial wind function", *Slovak Journal of Civil Engineering*, XVI:(3) pp. 21-33, (2008)
- [2] Pálóssy M., Szabó G., Szecsányi L.: "Mayfly footbridge, Szolnok - design, construction and dynamic behaviour of the longest footbridge in Hungary", *Steel Construction*. 3/2011, (2011)
- [3] Szabó G., Györgyi J., Kristóf G.: "Advanced flutter simulation of flexible bridge decks", *Coupled Systems Mechanics*, Vol. 1, Num. 2, pp. 1-22, (2012)

Hazai folyóiratcikk:

- [4] Györgyi J., Szabó G.: "Szélparaméterek numerikus vizsgálata", *Építés és Építészettudomány*, 38:(3-4) pp. 297-328., (2010)
- [5] Fornay Cs., Nagy A., Szabó G.: "Az M43-as autópályán épült Móra Ferenc Tisza-híd tervezése", *Vasbetonépítés*, 2011/5, 4. rész, (2011)
- [6] Szabó G., Györgyi J.: "Numerical simulation of the flutter performance of different generic bridge cross sections", *Periodica Poletecnica-Civil Engineering*, 55:(1,2) pp. 137-146. (2011) IF: 0.455, WoS link, Scopus link, DOI: 10.3311/pp.ci.2011-2.06, (2011)

Nemzetközi konferencia kiadványok:

- [7] Györgyi J., Szabó G.: "Calculation of wind effect by dynamic analysis using the artificial wind function", 6 Int. Conf. on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, pp. 9-12, #paper, pp. 1-14, Bratislava, 2007. 10. 18-19, ISBN 978-80-227-2732-7, (2007)
- [8] Györgyi J., Szabó G.: "Dynamic calculation of reinforced concrete chimneys for wind effect using the different codes and analysing the soil-structure interaction", #paper 1371, pp.1-12, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Rethymno, Crete, Greece, 2007. 06. 13-16, ISBN 978-960-254-682-6, (2007)
- [9] Györgyi J., Szabó G.: "Calculation of dynamic interaction of a train and an arch bridge". In: Frangopol K., (szerk.) Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics, Seoul, South-Korea, 2008.07.13-2008.07.17., pp. 2398-2405. Paper CD. (ISBN: 978 0 415 46844 2), (2008)
- [10] Szabó G., Györgyi J.: "Application of the Fluent software in civil engineering", Int. Conf. 70 Years of FCE STU, Section 02, Sub-section A, #paper3, pp.1-17, Bratislava, 2008. 12. 4-5, ISBN 978-80-227-2979-6, (2008)
- [11] Györgyi J., Szabó G.: "Fluid-structure interaction analysis with the ANSYS software in bridge aeroelasticity", In: 5th European & African Conf. on Wind Engineering. Florence, Italy, 2009.07.19-2009.07.23. Florence: pp. 1-12. Paper CD 087., (2009)

- [12] Szabó G., Györgyi J.: "Three-dimensional Fluid-Structure Interaction Analysis for Bridge Aeroelasticity", WORLD Congress on Engineering and Computer Science 2009, WCECS 2009, Vol II ,#paper, pp. 892-897, San Francisco, USA, 2009, ISBN 978-988-18210-2-7, (2009)
- [13] Szabó G., Györgyi J.: "Application of the ANSYS Software to Fluid-Structure Interaction Analysis", The Seventh Int.Conf. on Engineering Computational Technology, #paper 159, pp.1-19, Valencia, 2010, ISBN 978-1-905088-40-9nd, (2010)
- [14] Szabó G., Kristóf G.: "Three-dimensional numerical flutter simulation", The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010) Chapel Hill, North Carolina, USA May 23-27, 2010, pp. 1-8 (pen drive), (2010)
- [15] Szabó G., Györgyi J.: "Flutter Simulation and Measurement of generic Bidge Deck Sections", In: 9TH Int. Conf. on New Trends in Statics and Dynamics of Buidings. Bratislava, Slovakia, 2011.10.20-2011.10.21. Bratislava: pp. 1-18. (CD) Paper 42., (2011)
- [16] Szabó G., Pálossy M., Szecsányi L.: "Three-dimensional forced oscillation technique in flutter assessment", The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7) Shanghai, China; September 2-6, 2012, pp. 1-10, (2012)

Egyéb publikációk a szerkezetek dinamikája témakörben:

- [17] Györgyi J., Szabó G.: "Dynamic calculation of train-bridge interaction at arch bridge", #paper A-0262, pp.1-8, IABSE Symposium on Responding to Tomorrow's Challenges in Structural Engineering, Budapest, 2006. 09. 13-15, (2006)
- [18] Györgyi J., Szabó G.: "Dynamic train-bridge interaction at arc bridge", 5th Int. Conf on New Trends in Statics and Dynamics of Buidings, pp. 99-102, #paper, pp.1-14, Bratislava, 2006.10. 19-20, ISBN 80-227-2479-3, (2006)

Előadások:

- [19] Szabó G., Györgyi J.: "Szél dinamikai hatásának vizsgálata generált szélesebbé- függvény alkalmazásával", X. Magyar Mechanika Konferencia, Miskolc, (2007)
- [20] Szabó G.: "ANSYS szoftver alkalmazási lehetőségei az építőmérnöki tervezői gyakorlatban", ANSYS konferencia és partneri találkozó (CFD.hu Kft. szervezésében), Budapest, (2008)
- [21] Szabó G.: "Nemlineáris- és dinamikai feladatok Ansys környezetben", Gépészet 2008 konferencia, Budapest, (2008)
- [22] Szabó G.: "Bridge aero-elasticity simulation by using the ANSYS software", ERCOFTAC Spring Festival „panta rhei” Budapest University of Technology, Budapest, Hungary, May 4th, (2009)

- [23] Szabó G., Györgyi J.: "Bridge flutter assessment with three-dimensional fluid-structure interaction simulation", 17th Inter-Institute Seminar for Young Researchers, Krakow, (2009)
- [24] Szabó G.: "Bridge flutter FSI analysis", ANSYS konferencia és partneri találkozó, Darmstadt, (2009)
- [25] Szabó G.: "Three-dimensional numerical flutter simulation", ANSYS konferencia és partneri találkozó (CFD.hu Kft. szervezésében), Budapest, (2010)
- [26] Szabó G.: "Híd szekciók numerikus áramlás-szimulációja", ANSYS konferencia és partneri találkozó (CFD.hu Kft. szervezésében), Budapest, (2011)
- [27] Szabó G., Györgyi J., Kristóf G., Szabó Zs., Zelei A.: "Hídpályák belebegésének numerikus és kísérleti vizsgálata", XI. Magyar Mechanika Konferencia, Miskolc, (2011)
- [28] Szabó G.: "Három-dimenziós kényszermozgató eljárás hídszerkezetek belebegés vizsgálatához", ANSYS konferencia és partneri találkozó (CFD.hu Kft. szervezésében), Budapest, (2012)