

NAGY TÁMASZKÖZŰ ÍVHIDAK TERVEZÉSÉNEK A SZÉLTERHELÉSSEL KAPCSOLATOS KÉRDÉSEI

*Dr. Hegedűs István**

RÖVID KIVONAT

A dunaujvárosi ívhíd tervezésében végzett tanszéki közreműködés keretében áttekintettük a hidak szélterheinek vizsgálatára használható szabályzati eljárás elméleti alapjait és az alkalmazás részletkérdéseit. Ennek alapján javaslatot készítettünk a hídpályára és a függesztő kábelekre jutó szélteher dinamikus hatásaira vonatkozó vizsgálatok módszerére. Az Áramlás-tan Tanszékkal együttműködve számítási és mérési részfeladatokból álló programot hajtottunk végre a hídszerkezet aerodinamikai stabilitásvizsgálatának elvégzéséhez szükséges adatok meghatározására. A tanulmány ennek a munkának a közérdeklődésre számot tartó részleteit és eredményeit ismerteti.

1. BEVEZETÉS

A szerkezetek és az áramló levegő kölcsönhatásából keletkező szerkezeti mozgások és igénybevételek számításánál a kölcsönhatás különböző részletességű modellezését alkalmazzuk. A legegyszerűbb modell azon a feltevésen alapul, hogy a szerkezet csak a jelenlétével befolyásolja az áramlást. Ez a feltételezés lehetőséget ad arra, hogy a szerkezet mozgásait és igénybevételeit olyan módszerrel vizsgáljuk, amelyet az önsúlyterhek, járműterhek stb. figyelembevételére kialakítottunk. Ezt a módszert csak annak a hallgatólágos feltételezésnek az előre bocsátásával alkalmazhatjuk, hogy – hasonlóan a többi teherhez – a szélterhek alakulását nem befolyásolják a szerkezet alakváltozásai.

Mivel az így modellezett kölcsönhatás valóban lehetővé teszi a mérnöki szerkezetek erőtani vizsgálatában elterjedten használt fogalmak és módszerek szinte változatlan formájú alkalmazását, ezt a modellezést igyekszünk alkalmazni mindaddig, amíg az elhanyagolások nem okoznak elfogadhatatlanul nagy hibát a biztonság vagy a gazdaságosság kárára.

Voltaképpen a hagyományos mérnöki modellezés is túllép az említett hallgatólágos feltételezésen, amikor a terhekből számított alakváltozások és igénybevételek nagyságát egy dinamikus tényezővel növeli meg, amelynek a nagyságára a szerkezet speciális elrendezésű terhek hatására létrejövő elmozdulásai alapján következtet. De a dinamikus tényező alkalmazása nem borítja fel a hagyományos modellezés fogalomrendszerét, így annak sincsen akadálya, hogy a szélterhekhez a szerkezet kialakításától függő dinamikus tényezőket rendeljünk.

A karcsú, ill. a szélhatásaival szemben speciális érzékenységet mutató szerkezetek viselkedésében a kölcsönhatásnak a dinamikus tényező bevezetésével pontosított hagyományos alapú modellezése elfogadhatatlan, mert a szerkezet mozgásai is befolyásolják a szélteher nagyságát. A kölcsönhatás pontosabb, egyszersmind jóval összetettebb modelljében a szerkezet alakváltozásai visszahatnak az áramlásra. Ezt a visszahatást aeroelasztikus hatásnak nevezük. Ilyen modellezés esetén voltaképpen nincs is elvi lehetőség hagyományos értelmezésű szélterhek bevezetésére. Annak, hogy a méretezési előírások ilyen esetre vonatkozóan is

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

értelmeznek szélterheket, elsősorban az a célja, hogy az aeroelasztikus vizsgálatok eredményeit egyszerűbben lehessen a kapcsolódó méretezési feladatokba beépíteni [2,6].

Az aeroelasztikus hatások nehezen kezelhető nemlineáris differenciálegyenletek megoldásaként kaphatók meg, emiatt mindig csak olyan részletességű vizsgálatokra törekszünk, ami elengedhetetlenül szükséges e hatások figyelembevételére. Ez megnyilvánul a szélhatások figyelembevételét szabályzó előírásokban is, oly módon, hogy kiindulásként minden méretezési helyzetben a kölcsönhatás legegyszerűbb modelljének alkalmazását javasolják, és ahol csak lehetőség van rá, biztonságos közelítést jelentő korrekciós módszereket közölnek az aeroelasztikus hatások figyelembevételére [4,8].

Különösen komoly figyelmet érdemelnek azok az aeroelasztikus hatások, amelyek a szélsébség növekedésével a szerkezet igénybevételeinek sokkal gyorsabb ütemű, esetleg nagyságrenddel történő megemelkedését eredményezhetik. Ezt a jelenséget aerodinamikai stabilitásvesztésnek nevezzük. Az aerodinamikai stabilitásvesztéssel szemben a széltehervizsgálat feladata többnyire nem a megnövekedett igénybevételek, hanem az igénybevételek növekedésének felgyorsulásához tartozó kritikus szélsébség meghatározása, ill. olyan szerkezeti jellemzők felvétele amelyekhez a tervezés során figyelembe veendő legnagyobb szélsébséget biztonsággal meghaladó nagyságú kritikus szélsébség tartozik.

Nagy támaszközű hidak dinamikus hatásai közt első helyen szerepel a szélterhelés, egyre inkább megelőzve a forgalmi terheket. Ennek egyik oka az, hogy a teljes szélteher nagysága a támaszköz magasabb hatványa szerint növekszik, mint dinamikus hatást okozó forgalmi terhek nagysága. Ehhez hozzájárul, hogy a hídszerkezet lengésérzékenysége a támaszköz növekedésével egyre nő. Ezen két dolgot kell érteni: az egyik az, hogy a híd sajátlengéseinek a spektruma egyre inkább abba a frekvenciatartományba kerül, amelyben a szélterhek ingadozása a legerősebb periodikus gerjesztést képes kifejteni, a másik az, hogy a sajátfrekvenciák csökkenésével az aerodinamikai stabilitásvesztést okozó kritikus szélsébség egyre inkább megközelítheti a tervezés során figyelembe veendő szélsébség értékét.

Az alábbiakban nagy támaszközű ívhidak szélterhelésének kérdéseit a Dunaújvárosi Duna-híd tervezésében végzett közreműködői munkánk ismertetése kapcsán tekintjük át.

A hídszerkezeten dinamikus hatást keltő szélterhek ingadozását három különböző jelenségre vezethetjük vissza: a természetes szélstruktúrára, az örvénygerjesztésre és az aeroelasztikus hatásokra.

A természetes szélstruktúrát nem lehet érdemben befolyásolni, a hatásait is csak olyan értelemben, hogy a hídszerkezet lengési jellemzőit úgy igyekszünk megválasztani, hogy az igénybevételek ingadozása ne haladják lényegesen meg a teheringadozást. Ezeknek az ingadozásoknak a figyelembevételével foglalkozik a tanulmány második fejezete.

A szerkezetet érő örvénygerjesztés mértéke viszonylag tág határok közt befolyásolható a szerkezeti alak felvételével, ennek részleteit a tanulmány harmadik fejezete tárgyalja.

Az aerodinamikai stabilitásvesztéssel fenyegető aeroelasztikus hatások elkerülésére vonatkozó összetett vizsgálati programot a tanulmány negyedik fejezete ismerteti.

2. SZÉLTEHER-VIZSGÁLAT AZ MSZ EN 1991-2-4 SZERINT

Az Eurocode-alapú MSZ EN 1991-2-4 szabvány (a továbbiakban szabályzat) [9] az építmények szélteher-vizsgálatát a szélstruktúra jellemzőinek figyelembevételével írja elő.

A természetes szélstruktúra a felszíni (geometriai és hőmérsékleti) egyenetlenségek hatására turbulens mozgásúvá váló atmoszférikus határrétegben a tehetetlenségi és a súrlódási erők együttes hatására kialakuló sztochasztikus elrendezettség. Ezt – sztochasztikus volta ellenére – jól érvényesülő, fizikai elveken alapuló matematikai összefüggésekkel lehet leírni.

A szélstruktúrából származó teheringadozás hatását – ideértve a dinamikus hatást is – a szabályzat helyettesítő kvázistatikus szélteherrel veszi figyelembe. Ez a szélteher a szerkezet felületére merőleges irányú, intenzitása a terepszinttől mért z magasság függvényeként

$$q_w(z) = q_{ref} \cdot c_e(z) c_d c_f$$

alakban veendő fel. A képletben q_{ref} az átlagos torlónyomás, c_e a helyszíntényező, c_d a dinamikus tényező, c_f az alaki tényező. Az átlagos torlónyomást a v_{ref} referencia-szélsébség és a $\rho=1.20\sim 1.25$ kg/m³ légsűrűség alapján a

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho v_{ref}^2$$

képlet adja. A szabályzat szerint tíz perces átlagolású referencia-szélsébség a tervezés alapadata, amit a tervezett élettartam és a helyre vonatkozó szélsébség-mérések alapján vesznek fel. A v_{ref} szélsébséget vízszintesnek, ill. a terep dőlésével párhuzamosnak tekintjük.

A c_e helyszíntényezőt a magasság szerint változó értékével kell felvenni, de hidaknál megengedett egy z_{equ} reprezentatív magasságra vonatkozó konstans c_e érték alkalmazása.

A helyszíntényezőkön belül kell figyelembe venni a felszíni egyenetlenségnek a sebességeloszlásra vonatkozó hatását. A szabályzat ezt egy k_T egyenetlenségi tényezőtől (terepfaktor) és a terep egyenetlenségeit jellemző z_0 hosszról függő

$$c_r = k_T \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

érdességi tényező bevezetésével oldja meg. A képlet érvényességének felső határát a szabályzatok általában 200 m-ben adják meg.

A helyszíntényező veszi figyelembe azt is, hogy a szélsébség megnő, ha az átlagos egyenetlenségű domborzatból olyan terepegyenetlenségek emelkednek ki, amelyek terelik az áramlás irányát. Ezt a hatást egy c_t topográfiai tényező alkalmazásával építjük be a helyszíntényezőbe. Esetünkben a c_t topográfiai tényező értéke 1.

A referenciasebességhez tartozó szélprofil függvényt a c_r és a c_t tényező segítségével a

$$v_m(z) = v_{ref} \cdot c_r(z) \cdot c_t(z)$$

képlet szerint számíthatjuk.

A pillanatnyi szélsébség a $v_m(z)$ átlag körül ingadozik. Ennek a fluktuációnak a hatását is a helyszíntényező veszi figyelembe.

Ha a sebességfluktuáció arányos az átlagsebességgel, a széllokés csúcsebességét egy g csúcstényező bevezetésével $v_m(1 + g)$ szorzat formájában lehet felírni, a megnövekedett nyomást pedig az átlagsebességből számított torlónyomáshoz kapcsolt $(1 + g)^2 \approx (1 + 2g)$ szorzótényezővel (gust factor) vehetjük figyelembe [7]. (Ez a négyzetre emelés, ill. elhanyagolás ad magyarázatot a széllokés-tényezőben használt 2-es együtthatóra.) A szabályzat ezt az egyszerűsítő feltevést azzal teszi pontosabbá, hogy az

$$I_v(z) = \frac{k_T}{c_r(z) c_t(z)}$$

ún. turbulencia-intenzitásfüggvény bevezetésével

$$[1 + 2g I_v(z)]$$

formában figyelembe veszi a sebesség-fluktuáció viszonyított intenzitásának a magasság szerinti csökkenését.

A c_f erőtenyező (alaki tényező) értéke a Re Reynolds-szám és a felületi érdesség függvényében igen tág határok közt változik. A Reynolds-számtól való függéstől annak kritikus értéke fölött el lehet tekinteni. Ez a kritikus érték a hidak mérettartományában érdektelenül alacsony szélesebbé tartozik, ezért csak vékony szerkezeti elemek lokális vizsgálatában (pl. a függesztő kábelek vizsgálatában) lehet szükség a $c_f(Re)$ függvénykapcsolatra.

A hídszerkezetek vizsgálatában általában elhanyagolhatók a q_w felületi teher által keltett lokális igénybevételek, ezért c_f helyett a globális vizsgálat céljaira alkalmasabb c_D , c_L és c_M keresztmetszeti erőtenyezőket alkalmaznak. Ezek segítségével számíthatók a hídszerkezet hosszegységére jutó eltoló, emelő, ill. elforgató szélteher-komponensek az

$$f_{wD} = q_{ref} \cdot h c_e c_d c_D, \quad f_{wL} = q_{ref} \cdot h c_e c_d c_L \quad \text{és} \quad f_{wM} = q_{ref} \cdot h^2 c_e c_d c_M$$

képletekkel, amelyekben h a szélnek kitett felület magassága. A keresztmetszeti erőtenyezőket a felületi nyomások integrálásával vagy kísérletek alapján határozzák meg.

2.1. A dinamikus hatás egyszerűsített vizsgálata

Azoknál a szerkezeteknél, amelyeknél a mértékadó szélesebbé mellett nem várható a szerkezet rezonanciája, a szabályzat ún. egyszerűsített vizsgálatot ír elő. Az egyszerűsített vizsgálatban a csúcstényező $g = 3.5$ értékre veendő fel, ezzel a helyszíntényezőre a

$$c_e = c_r^2 c_t^2 \left(1 + \frac{7k_T}{c_r c_t} \right)$$

képlet adódik. A c_d dinamikus tényezőt a szerkezet kialakításától és méreteitől függő táblázatos értékek alapján kell felvenni.

Az egyszerűsített vizsgálathoz használt dinamikus tényezők táblázati értékei nemcsak az időben változó teherintenzitáshoz tartozó dinamikus többlet figyelembevételére szolgálnak, hanem a széllekedések egyidejűségének figyelembevételére is. Ha szerkezet valamely pontján a fluktuáció miatti tehernövekmény a maximumát eléri, innen távolodva egyre kisebb egyidejű növekmény lép fel, amit a méretezés biztonságának kára nélkül figyelembe is lehet venni. Ez magyarázza, hogy c_d táblázati értékei esetenként 1-nél kisebb értékek.

2.2 A dinamikus hatás részletes vizsgálata

A rezonanciára hajlamos szerkezetek dinamikus hatásait részletesebb vizsgálattal kell ellenőrizni. A vizsgálat kiinduló megfontolása szerint a szerkezet specifikus érzékenysége miatt nem választható el a csúcstényező és a dinamikus többlet vizsgálata, hiszen a gerjesztésre adott szerkezeti válasz nem csupán a gerjesztés intenzitásától, hanem a szerkezet különböző frekvenciákra vonatkozóan különböző gerjeszthetőségétől is függ.

A vizsgálatban ezért nem választjuk el a szerkezetre ható teher felvételét a lökészerű szélteherre adott „szerkezeti válasz” vizsgálatától, hanem a szél struktúrája és a szerkezet dinamikai jellemzői alapján meghatározzuk azt a terhet, amelyre a legnagyobb „szerkezeti válasz” adódik. Ennek érdekében a szélterhet is, a szerkezetnek a szélterhelésre adott „választ” is egy időben állandónak tekinthető ún. háttér-összetevőre és egy periodikus változást mutató ún. rezonáns-összetevőre bontjuk.

A legnagyobb szerkezeti válasszal azonos szerkezeti választ keltő kvázistatikus teher meghatározása az alábbiakban részletezett lépésekben történik. Ezek a lépések részben a turbulens áramlás fizikai törvényein, részben a sztochasztikus folyamatok elméletén alapuló, az építőmérnöki gyakorlatban kevésbé ismert összefüggések alkalmazását igénylik, amelyek bővebb kifejtésére e tanulmány keretében nincsen lehetőség.

Első lépésként meghatározzuk a szerkezet z_{equ} magasságára vonatkozóan a turbulencia helyettesítő integrális alaphosszát, ami a turbulens áramlás legfontosabb geometriai jellemzője. Ezt a hosszat lényegében a felszíni érdesség határozza meg. A szabályzat nagy kiterjedésű víztükör fölött az alábbi képlet alkalmazását írja elő:

$$L_{iequ} = 300 \left(\frac{z_{equ}}{300} \right)^{0.13}.$$

Az L_{iequ} ismeretében ki kell számítani a vizsgált szerkezet jellemző h függőleges és b vízszintes méretének figyelembevételével az

$$S = 0.46 \left(\frac{h+b}{L_{iequ}} \right) + 10.58 \left(\frac{\sqrt{hb}}{L_{iequ}} \right)$$

képlettel adódó arányszámot, amelynek felhasználásával a szerkezetre ható lökészerű teher v_0 ún. várható frekvenciáját számítjuk a következő képlettel:

$$v_0 = \frac{v_{mequ}}{L_{iequ}} \frac{1}{1.11S^{0.615}}.$$

Ezt követően meghatározzuk a szerkezet szélteherre vonatkozó válaszának háttér részének, ill. rezonáns-összetevőjének arányát képviselő Q_0^2 és R^2 mennyiségeket. Ezek számítására a szabályzat a következő képleteket adja:

$$Q_0^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{h+b}{L_{iequ}} \right)^{0.63}},$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2\delta} R_N R_h R_b,$$

ahol δ a szerkezeti csillapítás logaritmikus dekrementuma, R_N a szélesség ún. viszonyított logaritmikus spektrál-sűrűségfüggvényéből számított tényező, R_h és R_b a kovarianciát a szerkezet magasságának és szélességének megfelelően figyelembe vevő korrelációs tényezők.

Mindhárom tényező értékében meghatározó szerepet játszik a szerkezet n_{1c} első (ill. domináns) sajátfrekvenciájának és a v_0 várható frekvenciának az

$$N = \frac{n_{1c}}{v_0}$$

aránya. A tényezők képlete a következő:

$$R_N = \frac{6.8N}{(1+10.2N)^{5/3}},$$

$$R_h = \frac{1}{\eta} - \frac{1}{2\eta^2} (1 - e^{-2\eta}), \text{ ahol } \eta = \frac{4.6Nh}{L_{iequ}};$$

R_b értékét pedig R_h -hoz hasonlóan képezzük, h helyett b figyelembevételével.

A válasz háttér- és rezonáns részének meghatározása után meg kell határoznunk a válasz v ún. várható frekvenciáját. Ezt az alábbi képlet adja:

$$v = \sqrt{\frac{v_0^2 Q_0^2 + n_{1c}^2 R^2}{Q_0^2 + R^2}}.$$

A figyelembe vett legnagyobb szélhőkés dinamikus hatásával azonos választ kiváltó statikus teher számításához használható g csúcstényezőt az ún. extrémális eloszlás alapján a

$$g = \sqrt{2 \ln(vt)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \ln(vt)}}$$

képlettel számíthatjuk, ahol t a referencia-szélsebesség átlagolási ideje, azaz 10 perces átlagolás esetén 600 s.

Végül a $c_e c_d$ szorzatot a következő képlet adja:

$$c_e c_d = c_r^2 c_t^2 \left(1 + 2g I_{vequ} \sqrt{Q_0^2 + R^2} \right).$$

A szabályzat a részletes és az egyszerűsített számítás eredményeinek az összehasonlíthatósága érdekében a helyszíntényezőre az egyszerűsített vizsgálatban a

$$c_e = c_r^2 c_t^2 \left(1 + \frac{7k_T}{c_r c_t} \right)$$

képletet alkalmazza. Ezt a képletet a részletes vizsgálatban is érvényesnek tekintve a c_d dinamikus tényezőre formálisan a következő képlet adódik

$$c_d = \frac{1 + 2g I_{vequ} \sqrt{Q_0^2 + R^2}}{1 + 7I_{vequ}}.$$

A közölt képletek a legegyszerűbb tengelyvázlatú, egyetlen egyenes szakaszból álló szerkezetre vonatkoznak. A szabályzat függeléke foglalkozik összetettebb alakú szerkezetekkel is, amelyeknek a legegyszerűbb rezgésalakjainál is szükség van az egyidejű elmozdulások irányának a vizsgálatára, stb, de ezeknek a részleteknek esetünkben nincs jelentősége.

A szélteher dinamikus hatásának a fentiekben részletezett módon való figyelembevételével kapcsolatban bizonytalanságot okozhat a dunaújvárosi híd esetében az, hogy az MSZ EN 1991-2-4 előírásai közvetlenül csak 200 m támaszközig alkalmazhatók, holott a híd támaszköze a 300 m-t is meghaladja. A szabályzat elméleti hátterét áttekintve, ill. a szabályzat részleteit a szélterhek figyelembevételével kapcsolatos amerikai, japán stb. szabványokkal összevetve [4] azt lehet megállapítani, hogy az érvényességi határ túllépése inkább a gazdaságosság, mintsem a biztonság kárára szolgáló hibát okozhat.

3. A SZÉLIRÁNYRA MERŐLEGES GERJESZTÉS VIZSGÁLATA

A szerkezet körül áramló közeg áramlási képét a Re Reynolds-féle szám határozza meg, amelyet az alábbi képlet definiál:

$$Re = \frac{Lv}{\nu}.$$

A képletben L a szerkezet megegyezés szerint választott jellemző hossza, v a megzavarás nélküli áramlási sebesség, ν pedig a levegő kinematikai viszkozitása. Hidaknál L értékének a pályalemez szélességét, burkolt kábeleknél a kábel külső átmérőjét tekintjük.

A Reynolds-szám különböző értéktartományaiban a szerkezetek különböző fizikai folyamat eredményeként a szélirányra merőleges gerjesztést kaphatnak. Ebben a fejezetben ezeket a gerjesztéseket tekintjük át.

3.1. Az örvénygerjesztés

A szerkezet körüli ún. Prantl-féle határrétegben fonalas áramlás esetén is örvények keletkeznek, amelyek az áramlás irányában sodródva leválnak a határrétegről. A $Re < Re_{cr}$ Reynolds-számhoz tartozó sebességtartományban az örvényleválás periodikus. Emiatt a szerkezet felületére ható nyomásban az örvényleválással azonos periódusú ingadozás jön létre. Az

örvények keletkezése és leválása kapcsolatban áll a szerkezet alakjával és a felület aerodinamikai simaságával. A szerkezet alakja határozza meg Re_{cr} kritikus sebességet is, amely fölött az örvényleválás aperiodikussá válik. Re_{cr} hozzávetőleges értéke $2 \sim 5 \cdot 10^5$. Az örvénygerjesztés n_s frekvenciáját az

$$St = \frac{n_s L}{v}$$

Strouhal-féle összefüggés határozza meg, amelyben L a szerkezet keresztmetszetére jellemző hosszúság, v a szélesség, St pedig a keresztmetszet geometriai alakjától függő *Strouhal*-féle szám. Értékét aerodinamikai számítással vagy kísérleti úton lehet megállapítani. Kör keresztmetszetű sima felület esetén St jó közelítéssel 0.2.

Az MSZ EN 1991-4-2 az örvényleválásból származó keresztirányú periodikus teher számításához kör keresztmetszetre $c_{lat} = 0.7$ eltoló erőtenyező figyelembevételét írja elő.

Az örvénygerjesztés akkor okoz gondot, ha n_s nagy gyakoriságú $v_{cr,k}$ szélesség esetén egyenlő a szerkezet domináns sajátfrekvenciájával.

A megfigyelések szerint örvénygerjesztés nemcsak állandó sebességű fonalas áramlás esetén léphet fel, hanem a szélre jellemző turbulens légmozgás esetén is, ha az átlagos szélesség $v_{cr,k}$ értékéhez közel áll. Ez azzal magyarázható, hogy a hely és idő szerint változó sebességmezőnek szinte mindig található a szerkezet hossza mentén olyan régiója, ahol a pillanatnyi szélesség a $v_{cr,k}$ kritikus érték, másrészt a rezonancia közelében jelentkező aeroelasztikus hatások miatt az örvényleválás egy szűk sebességtartományban mintegy „leragadhat” a szabadlengés sajátfrekvenciájánál.

A Re_{cr} értéke fölött aperiodikussá váló örvénygerjesztés mintegy beleolvad a természetes szélstruktúra ingadozásaiba.

Széles pályalemezű hidaknál Re_{cr} értékéhez meglehetősen kicsiny szélesség tartozik. Ennek megfelelően a periodikus örvényleválásból a teljes hídszerkezetre adódó gerjesztő hatás is elhanyagolhatóan kicsiny. A szél dinamikai hatásaival foglalkozó ismeretterjesztő munkák gyakran hozzák példaként az örvénygerjesztés veszélyes voltára a Tacoma Narrow Bridge leszakadását 1940-ben, holott ezt a balesetet nem örvénygerjesztés, hanem olyan aeroelasztikus hatás okozta, amellyel a következő fejezetben foglalkozunk.

Függesztő kábeleknél viszont az örvénygerjesztés valóban problémát okozhat.

Jelöljük $v_{cr,k}$ -val azt a kritikus sebességet, amelynél az örvényleválás frekvenciája megegyezik a kábel k -adik sajátfrekvenciájával. A kritikus sebesség képlete:

$$v_{cr,k} = \frac{kD_c}{2StL_c} \sqrt{\frac{N_c}{m_c}},$$

ahol D_c a kábelátmérőt, N_c a kábelerőt, m_c pedig a kábel fajlagos tömegét jelöli. A hidak szokásos méretű és kihasználtságú függesztő kábeleik esetén az első lengésalakokhoz tartozó kritikus sebesség általában lényegesen kisebb a szélterhek számításában figyelembe veendő átlagos szélességnél, vagyis ilyen jelenség jelentős gyakorisággal létre tud jönni. A periodikus örvénygerjesztés hatásait ezért a kábelek méretezésében figyelembe kell venni.

Az örvénygerjesztés hatására a kábel a szélirányra merőleges síkban leng. A lengés y_F amplitúdója a következő képlettel számítható:

$$y_F = D_c K_w K c_{lat} \frac{1}{St^2} \frac{1}{Sc},$$

ahol K_w és K a lengésalak figyelembevételével számított tényezők, Sc pedig a *Scruton*-szám. Kábelek esetén KK_w jó közelítéssel $2D_c/l_c$, ahol l_c a szabadlengés hullámhossza. A *Scruton*-szám a szerkezeti csillapításnak az aerodinamikai gerjesztéssel szemben megmutatkozó hatékonyságát jellemző szám. Kábelek esetén:

$$Sc = \frac{2m_c \delta_c}{\rho D_c^2},$$

amelyben δ_c a kábelek szerkezeti csillapításának logaritmikus dekrementuma, ρ pedig a levegő sűrűsége. Ha a leerősítésnél vagy a kábel hossza mentén lengéscsillapító berendezést nem alkalmaznak, a δ_c értékét az acél anyag 0.006-os logaritmikus dekrementuma adja. Ebben az esetben Sc a kábel-keresztmetszet alapján közvetlenül felvehető érték, amelynek nagyságát lényegesen befolyásolja a nem teherhordó szerepű keresztmetszeti elemek kialakítása is. Jellemző értéke burkolt kábelek esetén 10~25.

Az örvénygerjesztésből származó mozgásokat elsősorban a kábelek megfogásainál fellépő feszültségingadozások által keltett anyagfáradás elkerülése érdekében kell mérsékelni.

A befogás hatásának figyelembevételére jó közelítés dolgozható ki, ha a kábelt egyik irányban végtelen hosszú, N_c fiktív nyomatéki ágyazású, EI_c hajlítási merevségű „félvégtelen” gerendaként a végpontján beiktatott $-\varphi(t)$ kényszerített szögforgásra vizsgáljuk ahol $\varphi(t)$ az y_F amplitúdójú rezgésalakhoz tartozó szögforgás a megfogási pontban.

3.2. A kábelek táncolása

A kritikus fölötti Re tartományban is bekövetkezhet keresztirányú gerjesztés az ún. táncolási jelenség (galloping) formájában.

Kör keresztmetszetű szerkezetek nem hajlamosak a táncolásra, a henger alakú kábelek sem. De ha a kábelen végigfolyó, vagy arra ráfagyó víz módosítja az alakot, a kör keresztmetszet is érzékennyé válhat. Mivel a nagy szélességek és a nagy intenzitású eső, ill. eljegesedés gyakran fordul együtt elő, ezt a lengési formát nem lehet figyelmen kívül hagyni [8].

A táncolás önvezérelt lengés a szélirányra merőleges síkban. Ilyen lengés a felfüggesztő kábelek esetében gyakorlatilag csak az ún. domináns azaz a legkisebb sajátfrekvenciához tartozó lengésalakban lép fel. Az a v_{CG} szélesség, amely megindítja a táncolást, kapcsolatban áll a keresztmetszet a_g ún. táncolási instabilitási tényezőjével és a táncolási alakhoz tartozó sajátfrekvenciával. A kapcsolat a következő:

$$v_{CG} = \frac{2Sc}{a_g} n_{c1} D_c .$$

A kör keresztmetszet instabilitási tényezője elméletileg zérus. A kör keresztmetszetű kábel táncolása így csak akkor következhet be, ha a keresztmetszetét a ráfagyó jég, vagy a kábel felületen végigcsurgó, a szél által is terelt esővíz módosítja. Ezeknek a módosító hatásoknak a figyelembevételére a szabályzat $a_g = 1$ instabilitási tényező felvételét javasolja. Az esővíz okozta táncolási instabilitás hatékonyan csökkenthető olyan árkok vagy bordák alkalmazásával, amelyek meggátolják azt, hogy a lefolyó vízréteg az instabilitáshoz vezető alakot vehessen fel.

Az Eurocode-ban is szereplő v_{CG} képlet meglehetősen borúlátó becslés. Hasonlóan borúlátó az a becslés, amelyet a francia feszítési bizottság kábelekre vonatkozó ajánlása közöl:

$$v_{CG} = 35 D_c n_{c1} \sqrt{Sc}$$

A tapasztalatok szerint az esővíz okozta táncolásra leginkább a 150 és 300 mm közti külső átmérőjű hosszú kábelek, 10 m/s és 15 m/s közötti szélesség esetén hajlamosak. Az ebből adódó problémák elkerülésének célszerű módja olyan csillapítást beépítése, amely a várt legnagyobb lengésamplitúdó alapján számított negatív aerodinamikai csillapítás mellett zérusnál nagyobb teljes csillapítást ad, és biztosítjuk a lehetőséget többlet-csillapítás beépítésére, ha a megfigyelt lengés a várt értéket meghaladja.

4. AZ AERODINAMIKAI STABILITÁS VIZSGÁLATA

A mérnöki szerkezeteken fellépő aerodinamikai stabilitásvesztés három formáját különböztetjük meg: a táncolást (galloping), a több szabadságú lengést (flutter) és az eltérést (divergencia).

Az előző fejezetben már említett táncolást olyan nyomásingadozás kelti amelynek kiváltója a felületi nyomáseloszlásnak a szerkezet mozgása miatti változása. A táncolás kialakulásához az szükséges, hogy a nyomásingadozás „pozitív” visszacsatolású legyen, vagyis a szerkezet mozgása a nyomáseloszlás olyan változását eredményezze, amely a mozgás irányában hat. Ilyenformán ezt az ingadozást maga a szerkezet vezérli, a gerjesztés mindig a szerkezet domináns sajátlengés-alakjához tartozó frekvenciával történik.

A táncolási érzékenységet a keresztmetszet megfelelő kialakításával, ill. módosításával lehet elkerülni. Gondosan mérlegelni kell azonban azt a lehetőséget is, hogy a szerkezet keresztmetszete a használat különböző állapotaiban megváltozhat, és ez a változás kedvezőtlenül befolyásolhatja a szerkezet táncolási érzékenységét.

A belebegés (flutter) a táncoláshoz hasonlóan önvezérelt lengés, de nem egy, hanem a hidak esetében két szabadságfokú mozgás. Ehhez is szükség van a nyomásingadozás „pozitív” visszacsatolására. Leggyakrabban a szélirányban elnyújtott keresztmetszetű szerkezeteken alakulhat ki, amelyeknek egymáshoz közeli sajátfrekvenciájú hajlító és csavaró sajátlengései vannak. (Ilyen aerodinamikai instabilitás következtében fellépő több szabadságfokú lengés miatt szakadt le a Tacoma Narrows Bridge.) Az összetett hajlító-csavaró lengés frekvenciája a hajlítási és a csavarási szabadlengés frekvenciája közé esik, és annál alacsonyabb szélesség mellett bekövetkezhet, minél közelebb esnek egymáshoz a kombinálódó lengések sajátfrekvenciái. A belebegési stabilitásvesztés elkerüléséhez ezért elsősorban a kombinálódó lengéstípusok sajátfrekvenciájának az elhangolása szükséges, továbbá olyan keresztmetszeti alak felvétele, amelynél az elmozdulás-elfordulás és a kitérítő erő-nyomaték visszacsatolása gyenge. Az utóbbi követelményt célszerű különböző kialakítású modelleken végzett aerodinamikai kísérletekkel vizsgálni.

Divergencia (kifordulás) akkor alakulhat ki, ha a pozitív elmozdulás-eltérítőerő visszacsatolás olyan erős, hogy az eredeti helyzetéből kimozduló szerkezet nem is képes abba visszatérni. Ilyen aeroelasztikus stabilitásvesztés hidaknál nem szokott bekövetkezni.

A dunaújvárosi ívhíd támaszköze kisebb azoknak a ferdekábeles hidaknak a támaszközénél, amelyekkel kapcsolatban a szakirodalomban részletes aerodinamikai stabilitásvizsgálat adatai találhatóak, viszont a legnagyobb támaszközű ferde síkú acélszerkezetű ívekkel kialakított ívhíd, ezért a híd részletes aerodinamikai stabilitásvizsgálatát feltétlenül el kellett végezni.

Viszonylag egyszerű vizsgálattal – a merevítő tartó keresztmetszeti arányai alapján - ki lehetett zárni a táncolással és a divergenciával bekövetkező aerodinamikai stabilitásvesztést, de a belebegés vizsgálata részletes vizsgálati program elvégzését igényelte.

4.1. A vizsgálati program

A híd aerodinamikai instabilitáshoz tartozó kritikus szélesség meghatározására vonatkozó vizsgálati program elméleti alapját a *Klöppel-Thiele* szerzőpáros [5] közleményében a hídszerkezetek pályalemezének vizsgálatára kidolgozott számítási eljárás képezte.

Az eljárás *T. Theodorsen* egy aeroelasztikai feladatmegoldásából indul ki. A matematikailag korrekt megoldás egy L támaszközű, B szélességű, μ egyenletes tömegeloszlású, EI hajlító és GI_t csavarási merevségű vékony és sima lemez belebegését előidéző v_{krsz} sebesség értékét szolgáltatja a felsorolt paraméterek függvényében. A megoldásból az derül ki, hogy v_{krsz} nagyságának alakulásában meghatározó szerepe van az azonos hosszirányú lefutást mutató hajlító és csavaró sajátlengés n_M/n_T hányadosának.

Reális keresztmetszeti méretek esetén az elméleti megoldás a tényleges kritikus szélességnek felső korlátja, a valóban instabilitást okozó v_{kr} szélesség pedig a gyakorlatban előforduló hídkeresztmetszet-alakoknál akár a fele, negyede is lehet v_{krsz} -nek, szélsőséges esetben még ennél is kisebb. Az elméleti eredmény gyakorlati alkalmazásához ezért szükség van a keresztmetszeti kialakítástól függő $\eta = v_{kr} / v_{krsz}$ hányados kísérleti úton történő meghatározása. Ennek a hányadosnak a kísérleti úton történő meghatározásához a BME Áramlástan Tanszék közreműködését kértük.

4.1.1. A modellkísérlet megtervezése Aeroelasztikus problémák kísérleti vizsgálatánál az aerodinamikai modellezés és a statikai-dinamikai modellezés modellhasonlósági törvényei együttesen szabják meg a vizsgálat lehetőségeit. Emiatt csak kivételes esetben jöhet szóba a teljes szerkezet modellezése, helyette több-kevesebb egyszerűsítéssel olyan modellezést végeznek, amely csak néhány kiemelt, a vizsgálandó jelenség alakulásában domináns hatású jellemző modell-hasonlóságát célozza meg. Ennek megfelelően csak a szerkezet jellemző részletét modellezzik.

A szélterhek alakulását a szerkezet közvetlen környezetében kialakuló áramlási viszonyok határozzák meg, az áramlasképet viszont befolyásolják a vizsgált akadály közelében fekvő egyéb akadályok is. A híd szerkezeti kialakítását az áramlástan vizsgálatok szempontjából megfelelően jellemző modell felvételénél ezért mérlegelnünk kellett, hogy a pályaszerkezetre ható szélterhek eloszlásának alakulásában elhanyagolható-e az ívek jelenléte.

A világhálón végzett szakirodalmi tájékozódás azt mutatta, hogy az ívhidak gerendaszerű pályaszerkezetére ható kvázistatikus szélteher vizsgálatához elegendő egy ún. szakaszmodell (section-model) alkalmazása. A hosszú szerkezetet képviselő szakaszmodell nyilván annál használhatóbb eredményt ad, minél jobban megközelíthető a modell környezetében az eredetihez hasonló, háromdimenziós, de kétdimenziósra egyszerűsíthető áramlaskép. Ehhez a tapasztalatok szerint a szakasz hosszúságát a szél irányában mért keresztmetszeti méretnél nagyobbra kell felvenni, lehetőleg aprólékosan követni kell a hídkeresztmetszet geometriai kialakítását, és a szakaszt a szél irányába eső terelőlapokkal kell lezárni. A szélcsatornában mereven rögzített szakaszmodell rögzítő elemein alkalmazott erőméréssel meg lehet határozni a szélteher komponenseit, ezekből vissza lehet számítani a keresett c_D , c_L és c_M alaki tényezőket. A modell felszerelhető olyan mérőeszközökkel, amelyekkel a felület aerodinamikai alakjának, ill. az áramlaskép jellegének a megváltoztatása nélkül mérni lehet a nyomásváltozást, ilyen nyomásmérő eszközök megfelelő elrendezésével az eredő alaki tényezők értékének az ellenőrzésére is felhasználható nyomáseloszlás mérhető ki a szerkezeten.

Ugyanez a modell, ill. mérőeszköz-rendszer használható a c_D , c_L és c_M alaki tényezők széliránytól való függésének a vizsgálatára, ehhez csupán azt kell lehetővé tenni, hogy a mereven rögzített modell síkjának a széliránnyal bezárt szöge változtatható legyen.

Az aeroelasztikus stabilitásvesztés - a belebegés - kialakulásában szerephez jutó szerkezeti jellemzők és hatások mérlegelésével megállapítottuk, hogy a belebegés vizsgálatához is elegendő a merevítő gerenda szakaszmodelljét használnunk, ha a merev rögzítést ehhez a vizsgálatához olyan mozgásszabadságú rugalmas felfüggesztésre cseréljük, amely lehetővé teszi a modell önvezérelt merevtest-szerű mozgásainak kialakulását a szélcsatornában. Ezek a mozgások egy függőleges translációs lengésből és egy a modell hossz tengelye körüli forgó lengésből tevődnek össze, a modell rugalmas felfüggesztését pedig olyan rugóállandókkal kell kialakítani, hogy a forgó és a translációs szabadlengés frekvenciájának az aránya azonos legyen a pályaszerkezet csavaró és hajlító lengéssel bekövetkező aeroelasztikus stabilitásvesztésében kombinálódó két lengésalak sajátfrekvenciájának arányával.

A modell felfüggesztésének megtervezéséhez ezért el kell végezni a hídszerkezet kellő részletességű lengésanalízisét.

4.1.2. A lengésanalízis Az aeroelasztikus hatás vizsgálatához elengedhetetlen azoknak a lengésalakoknak, ill. sajátfrekvenciáknak az ismerete, amelyekhez a pályaszerkezet egymással aerodinamikailag kombinálódó hajlító és csavaró lengése tartozhat. A gerendahidaknál ezek a kombinálódó lengések az egy félhullámú lengések, ívhidaknál viszont az egy félhullámú lengésekhez az ívek hosszváltozása tartozik, emiatt a legkisebb frekvenciához tartozó lengésalak is, az aerodinamikailag kombinálódó lengés-pár is várhatóan a pályaszerkezet két félhullámú lengése.

A lengésanalízist rúdmodell és véges elemes modell alkalmazásával is elvégeztük, a vizsgálat részletes leírása a [10] tanulmányban található. Az ívhíd szerkezeti kialakításához köthető sajátosság, hogy sok, a merevítő tartó egyes mozgáselemeiben nagy hasonlóságot mutató, egymástól többé-kevésbé eltérő periódusidejű sajátlengés alakulhat ki, ezért az aerodinamikailag kombinálódó lengés-pár kiválasztása az első mintegy húsz lengésalak tüzetes vizsgálatát igényelte. A kombinálódó lengés-párra valóban két félhullámú lengést kaptunk.

Az aerodinamikai modellkísérletek kiinduló adataként a pályaszerkezet részletes rajza mellett az aerodinamikailag kombinálódó lengéseknek a sajátfrekvenciáit adtuk meg az Áramlástan Tanszéknek.

4.2 Az áramlástani vizsgálatok

Az Áramlástan Tanszék az elvégzett vizsgálatok leírását és eredményeit három részjelentésben közölte. A szélcsatorna-vizsgálatok leírását és az eredmények ismertetését [3] tanulmány tartalmazza.

A mereven rögzített szakasz-modellen erőtenyezőkre vonatkozóan elvégzett mérések eredményei szerint kb. $\pm 2^\circ$ -ig az elfordulási szög változása és az emelőerő változása közt lineáris kapcsolat tételezhető fel, ugyanakkor a kb. 0.5° -nál nagyobb elfordulási szögek esetén a nyomatéki teher és az elfordulási szög kapcsolata pozitív visszacsatolású, azaz a mérések a belebegési hajlam meglétét, egyszersmind a szélcsatorna-vizsgálat indokoltságát igazolták.

A mérési programmal egyidejűleg numerikus szimulációt is végeztek a Fluent nevű véges elemes program alkalmazásával. Ez a vizsgálat azt mutatta, hogy a szerkezetről leváló nagy mozgási energiát hordozó örvények csekély dinamikus hatást gyakorolnak a szerkezetre, mert a felső felületen ilyen örvények nem keletkeznek, a szél felőli merevítő borda alsó éléről leváló nagy örvények pedig eltávolodnak a keresztmetszettől.

Az aeroelasztikus instabilitáshoz tartozó kritikus szélesebesség meghatározásra vonatkozó első mérésorozatban a szerkezet instabillá válását a több centiméteres kitérésű lengés megjelenéseként értékelték, de ehhez a szélcsatornában mért 20 m/s körüli szélesebességhez a valódi szerkezetre vonatkozóan irreálisan nagy szélesebesség tartozott. Ezért az önvezérelt lengés beindulásának meghatározására finomabb érzékelést biztosító eszközt alkalmaztak. Ez azt mutatta, hogy a kritikus szélesebesség a korábban megfigyeltnél lényegesen alacsonyabb, a szélcsatornában 9.9 m/s, amelyhez a [5]-ben ismertetett számítási eljárás a vizsgált keresztmetszetre vonatkozóan $\eta = v_{kr} / v_{krsz}$ hányadosára 0.545 értéket ad. Ezt az értéket javasoltuk a tervezőknek a belebegési kritikus sebesség számításához. Az így számított kritikus szélesebesség megnyugtatóan nagyra, 60 m/s körüli értékre adódott.

Az Áramlástan Tanszék a szélcsatorna-vizsgálatokkal párhuzamosan elvégzett egy ún. nagy-örvény (large eddy) szimuláción alapuló vizsgálati programot is [6], amelynek a célja az volt, hogy a pályaszerkezet körül kialakuló áramlási viszonyok kvalitatív analízisével ellenőrizni, ill. pontosítani lehessen a „section modellen” végzett vizsgálat eredményeit.

Az eredeti vizsgálati programban nem szerepelt a híd pályaszerkezetén kívüli szerkezeti elemekre ható szélteher vizsgálata, mert ezek a terhek a korábbi tapasztalatok alapján gond nélkül felvehetőnek látszottak. Az ívekre ható szélnyomás figyelembevételével kapcsolatban azonban felmerült, hogy a szélirányban egymás mögött fekvő ívek egymás szélterhét befolyá-

solhatják. Az Áramlástan Tanszék ezért numerikus szimulációval meghatározta az ívekre jutó szélteher eltoló komponensének alakí tényezőjét az ív-keresztmetszetek négy különböző távolsága esetére [1]. Az eredmények azt mutatják, hogy a szél felöli ív jelentős árnyékoló hatással van a másik ív terheire, sőt, bizonyos esetekben a hátsó ívre ható szélteher eltoló komponensének iránya a széliránnyal ellentétes is lehet.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmányban bemutatott vizsgálati elvek és eredmények felhasználásával határozták meg a Dunaújvárosi Duna-híd ajánlati tervéhez készült erőtani vizsgálat során a szerkezet szélterheit, ill. végezték el a híd merevítő tartójának és függesztő kábeleinek az aerodinamikai stabilitásvizsgálatát. Az utóbbi vizsgálat a merevítő tartó kielégítő aerodinamikai stabilitását mutatta, viszont a függesztő kábeleknek a szél és a csapó eső együttes hatása által kiváltott lengéssel szembeni stabilitását nem lehetett minden kétséget kizáróan igazolni. Ez a hatás azonban jelentősen mérsékelhető a kábelek felületének és megfogásának megfelelő kialakításával, amit a kábelgyártó cégek igyekeznek „gyárilag” is biztosítani. Ezért a tervezők nem terveztek a külön lengéscsillapítót a kábelekhez, de olyan kábel-megfogást alakítottak ki, amelybe szükség esetén megfelelő hatékonyságú többlet-lengéscsillapítást adó szerkezet építhető be.

Az ismertetett vizsgálatok egyes eredményeit felhasználtuk az M0 Autópálya Északi Duna-hídjának független erőtani ellenőrzése során is.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Csécs Á.- Lajos T.: Hídtartók ellenállástényezője, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke, Tudományos Közlemények*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, (2005).
- [2] Davenport A.G.: Past, Present and Future of Wind Engineering. *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, (2002), pp 1371-1380.
- [3] Goricsán I.- Balczó M.- Lajos T.: A Dunaújvárosi Duna-híd aerodinamikai vizsgálata: szélcsatorna kísérletek, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke, Tudományos Közlemények*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, (2005).
- [4] Kijewski T. - Kareem A.: Dynamic Wind Effects: A Comparative Study of Provisions in Codes and Standards with Wind Tunnel Data, *Wind and Structures* 1(1) (1998), pp 77-109.
- [5] Klöppel K.- Thiele F.: Modellversuche im Windkanal zur Bemessung von Brücken gegen die Gefahr winderregter Schwingungen, *Der Stahlbau*, 32, (1967), pp 353-365.
- [6] Lohász M. - Lajos T.: Híd metszet áramlástan vizsgálat a nagy-örvény szimulációval, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke, Tudományos Közlemények*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, (2005).
- [7] Solari G. : Gust Buffeting. I: Peak Wind Velocity and Equivalent Pressure, II: Dynamic Alongwind Response. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119. No. 2. (1993), pp 365-398.
- [8] Saito T. - Matsumoto M. - Kitazawa M.: Rain-Wind Excitation of Cables on Cablestayed Higashi-Kobe Bridge and Cable Vibration Control, *Proceedings of Conference on Cable-Stayed and Suspension Bridges*, (1994) pp 507-514.
- [9] MSZ ENV 1991-2-4:1999. (Eurocode 1): A tervezés alapjai és a tartószerkezeteket érő hatások 2-4. rész: A tartószerkezeteket érő hatások. Szélhatás.
- [10] Dunaújvárosi Duna-híd. Mederhíd-statikai vizsgálatok. A Hidak és Szerkezetek Tanszéke vizsgálati jelentése, 2004. április.