

A DUNAÚJVÁROSI PENTELE HÍD TERVEZÉSE

Horváth Adrián

szerkezettervezési igazgató
hid@fomterv.hu

Nagy Zsolt

acélszerkezeti szakfőmérnök
FŐMTERV Zrt.

Bevezetés

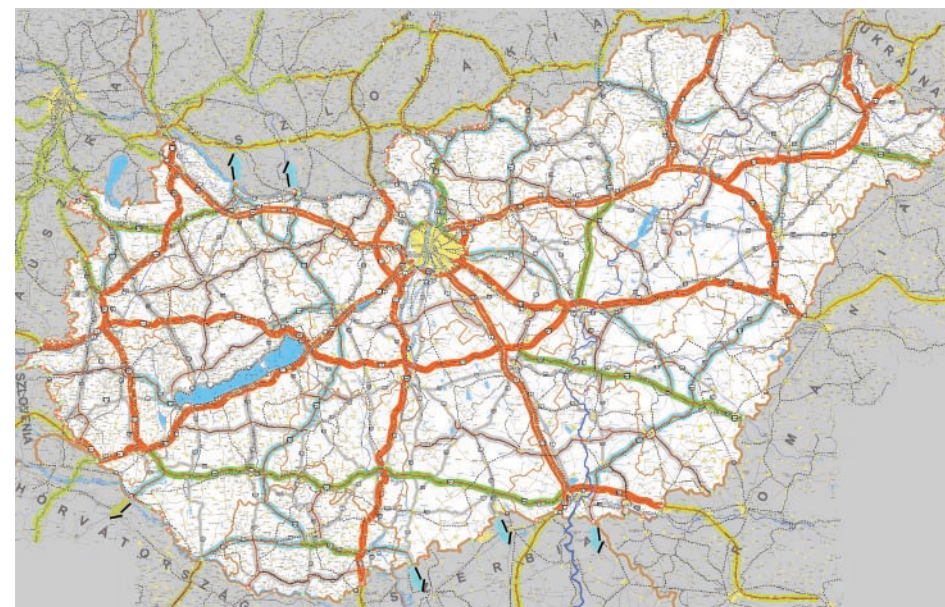
A Nemzeti Autópálya Zrt. pályázatot írt ki a dunaújvárosi Duna-híd engedélyezési tervének elkészítésére, melyet a FŐMTERV Fővárosi Mérnöki Tervező Részvénytársaság nyert meg alternatív ajánlatával. A kiviteli terveket, majd – a kivitelezői közbeszerzési eljárás után, annak nyertese, a Vegyépszer Zrt. és a Hídepítő Zrt. alkotta DunaÚJ-HÍD Konzorcium megbízására – a gyártási terveket szintén a FŐMTERV Zrt. készítette. A mederhíd tervezését a BME kísérleti, kutatói és szakértői munkája segítette, az ártéri hidak felszerkezetét – a FŐMTERV Zrt. megbízásából – altervezője, a Pont-TERV Rt. tervezte. A mederhíd kiviteli terveinek kijelölt független ellenőrei a pozsonyi Szlovák Műszaki Egyetem (SUT Bratislava) Építőmérnöki Karának dr. Agócs Zoltán vezette munkatársai voltak, akik tanácsaikkal is segítették a tervezést.

A dunaújvárosi Duna-híd az M8-as autópályát vezeti át a Duna-folyó és annak ártere fölött. A Veszprém–Kecskemét M8-as autópálya-szakasz, elkészülte után, az M0-s nyugati szakasza mai forgalmának 40 %-át veheti át, a híd jelentősége azonban ennél sokkal nagyobb: az észak–dél irányú európai VI-V/CT tengely és a nyugat–keleti irányú TEN-fo-

lyosó Pó-síkságtól (Genova)–Milánó–Grác–Dunaújváros–Nagyvárad–Brassó–Bukareszt át Constanzáig (Fekete-tenger) tartó európai közúthálózati elemének csomópontjában épült (1. ábra). Az előző években az új autópályák nyomvonalán (például: M0 budai szakasza, M8 megépült szakaszai 8-as út néven) fél szélességben, kétszer kétsávos autóútként épültek meg az új utak. A híd megépítését megelőzően sokéves térségfejlesztési és gazdasági megtérülést elemző vizsgálati munka folyt, amelynek eredményei azt mutatták, hogy az M8-s autópálya M6–51-es út közötti szakaszát azonnal teljes szélességben célszerű megépíteni, majd rögtön ezt követően ki kell építeni a Veszprém–M6-os Dunaújváros szakaszt és az 51-es út–Kecskemét–Szolnok szakaszt. Az autópálya ott – a később megépíteni tervezett – M4-es autópályához fog csatlakozni. Osztrák és román szomszédaink ezeket a fejlesztéseket figyelembe véve fejlesztik saját úthálózatukat, és egyre sürgetőbben várják a magyar oldali befejezést.

A híd helyének meghatározása

Az M8-as autópálya helyét több helyen keresték. A meglévő országos közúthálózat szerkezetét figyelembe véve a Rácalmás–Dunaújváros közötti nyomvonal lett volna a legal-



1. ábra • Magyarország tervezett gyorsforgalmi főúthálózata

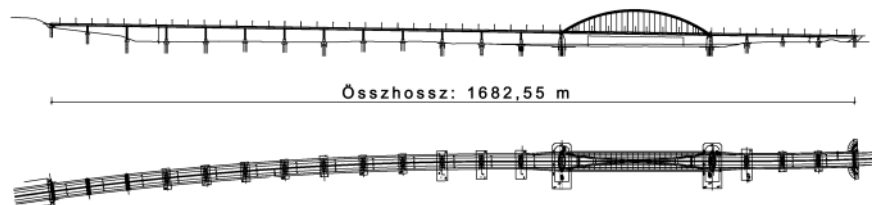
kalmassabb. Dunaújvárostól északra azonban Rácalmásig nem találtak a tervezők konfliktusmentes folyosót. Az üdülőkkel sűrűn beépített, természetvédelmi területen áthaladó úttal szemben teljes társadalmi elzárkózás bontakozott ki.

A Dunaújvárostól jóval délebbre, Apostag és Dunaegyháza között vizsgált nyomvonal a dunaföldvári híd és az 52. számú főút közelsége miatt nem hozta volna azokat a külső hatásokat, amelyek a beruházást nemzetgazdasági szinten hatékonytá tették volna.

Harmadikként maradt a két fenti nyomvonalváltozat közötti lehetőség: a Dunavecse és Apostag közötti átvezetés. E nyomvonal társadalmi elfogadtatása sem volt egyszerű. A Kiskunsági Nemzeti Parkot keresztezni a legszigorúbb és legkeményebb környezetvédelmi előírások betartásával sem lesz egyszerű.

A Pesti-síkság és a Mezőföld löszplatója mintegy 50 m-es szintkülönbséggel, meredeken leszakadó löszfalban találkozik a területen.

A megfelelő hossz-szelvény kialakíthatósága, továbbá a lösztalaj sajátos szerkezeti tulajdonságaiból adódó talajmechanikai szempontok szükségessé tették, hogy a nyomvonal lehetőség szerint természetes eróziós völgyben érje el a platót. A lehetséges kivezetési pontok mellett további kötöttséget jelentett a Duna fölött átfeszített 120 kV-os nagyfeszültségű távvezeték nyomvonala. Az egyeztetések során tisztázódott, hogy annak kiváltásával reálisan nem lehet számolni, így azt mind a vonalvezetés, mind a szerkezetválasztás során adottságként kellett kezelni. A bal parton a nagyfeszültségű vezeték mellett két település, Dunavecse és Apostag határvonalát kellett figyelembe venni a helyszínrajzi tervezéskor. A tanulmánytervi nyomvonalat mindezek miatt módosítva, a tervezett út a kisapostagi vízfolyáson levő tavat délről kikerülve, egy természetes eróziós völgyben éri el a partfalat, majd a 120 kV-os vezeték kilengését és előírt védőtávolságát figyelembe véve 7000 m suga-



2. ábra • A Pentele híd hosszszelvénye és felülnézete

rú jobb ívvel halad át a rekultivált szeméttelp, feltöltött zagytér, majd az Apostagi-sziget fellett. (2. ábra) A mederhídhoz átmeneti ívvel csatlakozva a folyamot egyenes tengellyel keresztelzi, majd azonos sugarú bal ívvel csatlakozik a településhatárhoz igazodó bal parti nyomvonalhoz.

A híd magassági vonalvezetését az építés-technológia és a gazdaságosság szempontjai alapján határoztuk meg. A jobb parti 1 km-es hídhosszból és az autópálya szélességéből adódó építési feladat mértéke alapján egyértelmű volt, hogy ezt az ártéri felszerkezetet a Duna-meder fölől szerelve, szakaszos előretolással célszerű megépíteni. A löszfal pereménél a nyomvonal keresztelzi az iránytöréssel továbbhaladó nagyfeszültségű vezetékét. Az építési és végleges állapotban biztonsági okokból egyaránt szükséges védőtávolság miatt mintegy 10 m-es bevágás létesítése volt indokolt, melynek optimumát egyrésztől a csatlakozó ártéri híd pillérei magassága, másrésztől a löszterület talajmechanikai adottságai szabták meg. Így alakult ki az állandó 1,46 %-os emelkedésű hossz-szelvény. A bal parton, hogy az árterületet ne szűkítsük, a hídfő az árvédelmi töltés mögé, a mentett oldalra épült. Az árvédelmi töltés tetején lehetővé kell tenni munkagépek zavartalan közlekedését, az árvízi védekezést, illetve a töltés fenntartási munkáit, ezért a híd alsó éle kb. 4,50 m-rel a töltés síkja fölött halad. Ez a még elfogadható legki-

sebb magassági méret határozta meg ezen a parton a pillérek és a hídhoz csatlakozó töltés magasságát. A híd teljes hossza 1682,55 m.

Az ártéri hidak 7000 m sugarú vízszintes ívben fekszenek, átmeneti ívvel csatlakozva az egyenes tengelyű mederhídhoz.

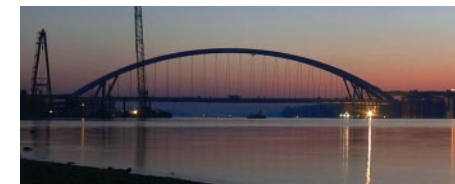
A szerkezet megválasztása

A tervezéssel párhuzamosan történtek meg a VITUKI-ban a folyó hidrológiai vizsgálatai. Az érintett folyamszakaszon már korábban elvégzett mederrendezés eredményeképpen a szabályozott Duna mederszélessége mintegy 450 m lesz, a nyomvonalától délre levő gát és párhuzammű által határolt területen a meder feltöltődése évek óta zajlik. Mindezeket mint alapadatokat figyelembe véve a mederpillérek tengelytávolságát 312 m-re választottuk. A középvízi part és a mederpillérek között így elegendő távolság maradt az uszadék- és jégmozgás, illetve a parti hajózás részére, a választott távolság ugyanakkor lehetővé tette, hogy a pilléreket TS-uszályokból kialakított bejáróhídról építsék meg. A mederhíd így megválasztott 307,9 m-es támaszközével a folyó két oldalán működő, illetve tervezett kikötők hajóforgalma a kivitelezés alatt és a későbbiekben egyaránt zavartalan lehet.

Ebben a nyílástartományban két szerkezet típus versenyez egymással: a ferdekábeles hidak¹ (3. ábra) – Oszakában is ilyen szerkezetet választottak a 300 m-nél nagyobb nyí-



3. ábra • Ferdekábeles híd
Alex Fraser híd a Fraser-folyó fölött,
British Columbia, Kanada



4. ábra • Ívhíd egymás felé dőlő
(kosárfül elrendezésű) két ívvel
Pentele híd, Dunaujváros

lásokhoz – és a kosárfül elrendezésű ívhidak (4. ábra). Évezredek óta építenek boltozott szerkezeteket kőből és több mint száz éve hasonló erőjátékú ívhidakat vasból, acélból, vasbetonból. A döntően nyomott ívszerkezet előnyös tulajdonságai ellensúlyozták a kivitelezési nehézségeket, és kényelmetlenségeket, amelyeket leginkább az építkezés helyszínén szükséges állványrendszer okoz. Ilyen szerkezet például az 1963-ban épült Fehmarnsundbrücke a tenger fölött és a Van Brienoord híd Rotterdamnál, a Maas-folyó torkolatában (1965). Az 1960-as évek közepén viszont egy kiváló új szerkezet és építéstechnológia jelent meg, a támaszaitól két irányba szerelt, oszlop(ok)ra kábelekkel közben felfüggesztett gerendahíd, az ún. ferdekábeles híd (Leverkuseni híd, 1965; Maxau híd, 1966). Ezek a szerkezetek a nagyobb nyílástartományokból kiszorították az ívhidakat. Hollandiában viszont szűknek bizonyult a fent említett rotterdami ívhíd, és 1986–90 között azonos szerkezeti rendszerű hidat építettek mellé. Ezt más helyszínen – Zwijndrechtben – szerelték össze, s a 4800 tonnás szerkezetet egyben, hajók fedélzetén úsztatták végleges helyére.

A Pentele híd nyomvonalához közeli 120 kV-os légvezeték magas oszlopai a térben esetlegesen helyezkednek el. Ezért – esztétikai

¹ Ferdekábeles híd például a jelenleg az M0-s körgyűrűn Budapesttől északra épülő Duna-híd (Lásd Kisbán Sándor cikkét).

okokból – a magas pillérű ferdekábeles hidat elvetettük, s megvizsgáltuk az ívhíd megépítésének lehetőségét. A bal parti kikötő alatt szerelőtérnek kiváló helyet találtunk, a Duna az év nagy részében hajózható folyó, ezért e mellett a szerkezet mellett döntöttünk. Ez a szerkezet előnyösebb a kisebb kábel-mellékfeszültségek, kisebb baleseti érzékenysége és nagyobb merevsége miatt is a ferdekábeles hídnál. A kábelekkel függesztett merevítőtartós ívhidaknál különféle kábelrendezés lehetséges. A leggyakoribbak az egymást keresztelző kábelekkel épült hidak, mert ez eredményezi a legmerevebb szerkezetet. Pozsonyban – esztétikai okokból – lefelé sűrűsödő, sugaras elrendezést választottak. Mi – szintén esztétikai megfontolásból – a minden nézetből rendezett képet mutató párhuzamos kábelrendezést kívántuk megvalósítani, melynek lehetőségét a BME gondos stabilitási vizsgálataival lehetett igazolni.

A híd leírása

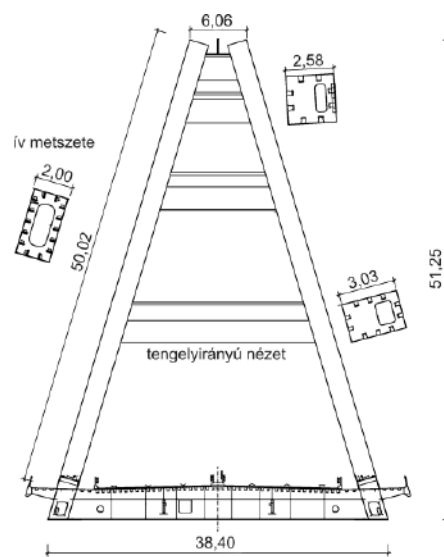
Törekedtünk arra, hogy gyorsan és hatékonyan építhető, gazdaságos és esztétikus, jól üzemeltethető hidat tervezzünk. A terepviszonyokhoz legjobban igazodni és a funkciót tökéletesen kiszolgálni, egyben ezeknek a célokknak is megfelelni öt különálló hídszerkezet együttesének tervezésével volt lehetséges.

Az ártéri hidak folytatólagos többtámaszú, ortotrop pályalemez, acél szekrénytartós ge-

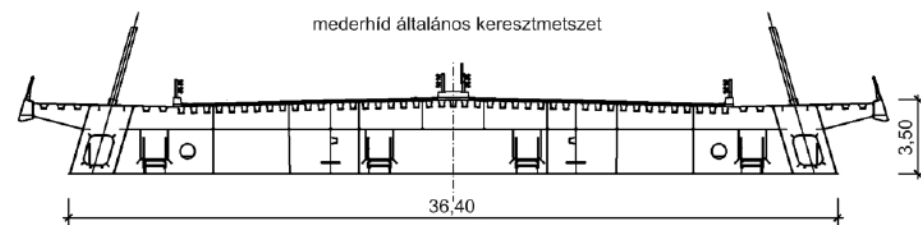
rendahidak, szerkezeti magasságuk a mederhíd merevítőtartójával közel azonos, 3,56 m. A jobb parti ártér fölötti szerkezet támaszközei a hídfőtől: 75,00 + 12 × 82,50 m, a bal parti 4 × 75,00 m. Az ártéri hidakon az autópálya két különböző irányú pályája két egymástól független, egymással párhuzamos hídszerkezeten, 7000 m sugarú ívben van vezetve. A két hídpálya közötti légrés 0,60 m, így a híd teljes szélessége 32,20 m. A szerkezeti elemek acélminősége: S355.

A kéttámaszú mederhíd kábelekkel függesztett merevítőgerendás, kosárfül elrendezésű ívhíd gyártott támaszköze 307,8 m, a sarutengelyek távolsága hídtengetelyirányban ennél 10 cm-rel több az önsúlyterhelés hatására létrejövő megnyúlás után. A szabadnyílás a szerkezeti gerendák homloksíkjai között 304,40 m, a felszerkezet elméleti hossza, a csatlakozó dilatációs szerkezetek tengelyének távolsága, 311,95 m. Az ívek dőlése 16,5°, tengelyük magassága hídközépen 48 m (5. ábra). Az ívet a merevítőtartóval függesztőkábelek kötik össze. A kábelek igénybevételeit alapvetően az ívtartó és a merevítő tartó merevségi viszonyai, a geometriai kialakítás és a feszítési technológia határozza meg. Az igénybevételek változásának megfelelően, a támaszok közelében 24, a híd közepe közelében 18 pázmás kábelt építettek be. Az egy ütemben kiépülő pálya beosztása: 2 × 3,75 m forgalmi, 3,50 m széles leállósáv, a két irány között 3,60 m széles elválasztósávban 2 × 1 m biztonsági sáv, 1,60 m kiemelt szegéllyel (6. ábra). A híd befolyási oldalán kétnyomú kerékpárút létesült, a kifolyási oldal – a jövőbeni igényekhez alkalmazkodva – azzal azonos kialakítású. A mederhídon az útpálya tengelye egyenes, a híd a középtengelytől két irányban 2,5-2,5 %-kal, a járdák felülete a kiemelt szegély felé esik 2,5 %-kal.

A mederhíd felszerkezete több szempontból is áttörést jelent a magyar hídépítésben. Mivel a mederhíd úsztatva jutott a szerelőtérre a pillérekre, a lehető legkisebb tömegű szerkezetet kellett tervezni. Ezért választottunk a hazai hídépítésben először nagy szilárdságú, S460-as acélt, azokhoz a szerkezetreszekhez, ahol a szilárdság növelését hatékonyan ki lehet használni, azaz a lemezvastagságot, ezzel a varratméreteket és mennyiségeket, továbbá az anyagmennyiséget és ezzel a tömeget csökkenteni lehet: az ívtartókban, a csatlakozó merevítőtartó és végkeresztartó elemeken. A nagyszilárdságú acél folyáshatára mintegy 30 %-kal magasabb, mint a hídszerkezeteknél eddig alkalmazott S355 minőségű acélok folyáshatára, ennek megfelelően a méretezési feszültség – a lemezvastagság függvényében – szintén kb. 25 %-kal magasabb a szokásos minőségű acélhoz képest. A nagyszilárdságú acél alkalmazása az úsztatási tömeg mintegy 10 %-os csökkentését tette lehetővé.



5. ábra • A Pentele híd mederhídjának keresztmetszete



6. ábra • A Pentele híd mederhídja pályájának általános keresztmetszete

Külön elemzés készült, hogy az S460 szilárdsági csoporton belül a normalizált vagy a termomechanikus hengereléssel gyártott-e a kedvezőbb. A nemzetközi hídépítési tapasztalatok feldolgozását követően termomechanikusan hengerelt, az MSZ EN 10112-3:1995 szabvány szerinti S460ML acélt választottuk. Ez tette lehetővé, hogy a rendkívüli igénybevételeknek kitett, a lehetőségek határáig merevített támasz fölötti csomópontban előmelegítés nélkül, azaz emberi körülmények között lehessen hegeszteni. A mai acélanyagú hidakban a lemezeket hegesztéssel vagy csavarozással kapcsolják egymáshoz, sokszor a két kötésmódot együtt alkalmazva. A kosárfül alakban elrendezett ívszerkezet geometriai összetettségéből és az egyes kapcsolattípusok eltérő méretpontosságú igényeiből következett, hogy a szerkezeti elemek valamennyi kapcsolata hegesztéssel készüljön.

Az ívtartók téglalap keresztmetszetű zárt szelvények, a gerinc magassága 3800 mm, a felső öve 2140 mm, a gerincek között elhelyezett alsó öv 1960 mm széles. Az övlemezek vastagsága 20–50 mm, a gerinclemezeké 16–40 mm között változik. A lemezhorpadást hosszbordák akadályozzák meg. A hosszbordák általában 280-22 szelvényű laposacélok, a beúsztatási állapotban szükséges ideiglenes rudak környezetében erősített T-szelvények. A bordák a függesztési pontok harmadában levő diafragmák kivágásain átfutnak, és azok-

hoz fülekkel vannak rögzítve. Az íveket nyolc gerenda köti össze. Ezek mérete, az igénybevételeknek megfelelően, az alsó kettő-kettőnél 3800 × 2500 mm, a hídközépen lévő kettő-kettőnél pedig 2600 × 2500 mm.

A merevítő tartók az ívekkel közös síkban vannak, így a paralelogramma keresztmetszetű merevítő tartók merőleges gerinctávolsága az ívtartók gerinctávolságának felel meg. Belmagasságuk tartótengelyben 3100 mm, felső övük a pályalemez esésének megfelelően 2,5 %-kal esik a hídközép felé. Az övlemezek vastagsága 20–50 mm, a gerinclemez vastagsága 16–40 mm között változik. A merevítőtartókat 11 400 mm-enként velük azonos szerkezeti magasságú, függesztett keresztartók kötik össze. A keresztartók gerinclemezeinek vastagsága 16 mm, az alsó övlemez 650-25 mm szelvényű. A függesztő kábelek ezekben a csomópontokban csatlakoznak. A lehorgonyzó csöveket 20 mm vastagságú diafragmába behegesztve történik a kábelerők bevezetése a gerinclemezekbe (7. ábra). A merevítőtartók nagy távolsága okán két hosszartóra is szükség volt. A hosszartók – alsó övüknek a függesztett keresztartókon való átvezethetősége érdekében – 500 mm-rel alacsonyabb gerincmagasságúak. A hosszartók gerinclemeze 16 mm vastag, alsó öve 800-40 mm méretű.

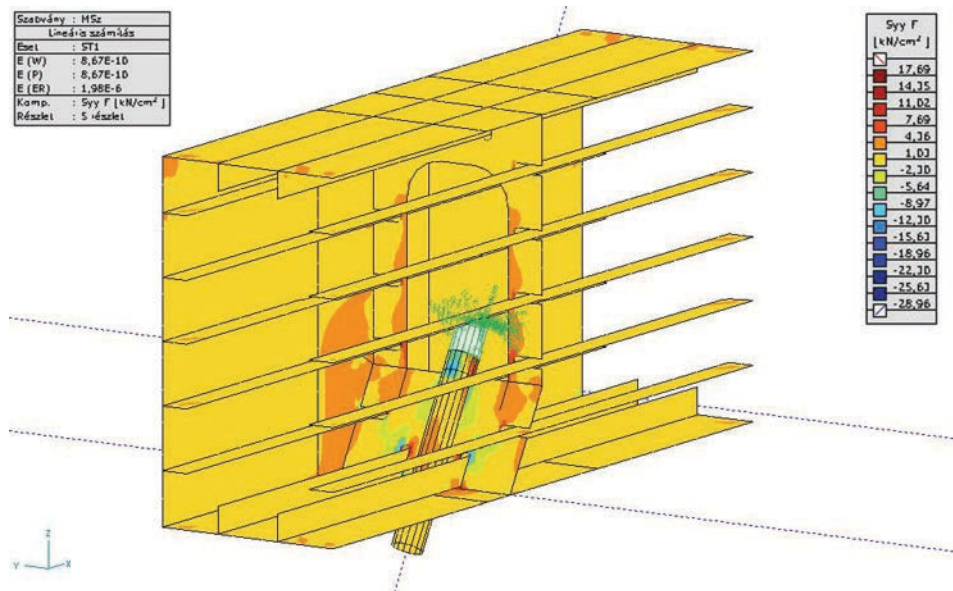
Az ortotrop pályaszerkezetet a függesztett keresztartók között 3800 mm-ként levő közbenső keresztartók támasztják alá. A kereszt-

tartók a merevítőtartóban részlegesen befogott, a hossztartókkal rugalmasan megtámasztott tartóként viselik terhüket. A pályalemez 12 mm-es acéllemez. A pályalemezt 8 mm lemezvastagságú, trapézszelvényű bordák merevítik. A gyalogjárda ortotrop acél pályaszerkezete a merevítőtartókba befogott konzolokra támaszkodik, és egyben – a merevítő tartó alapszelvényének részeként – mint felső öv dolgozik.

A sárvári Rába-hídon szerzett tapasztalataink alapján itt is párhuzamos pászmás függesztőelemeket terveztünk. A feszítőkábelek bekötése a diafragmába hegesztett fogadócsövekbe történik.

A mederhíd és az ártéri hidak összhangját és egységességét az alépítmények megfelelő kialakításával is szükséges volt megoldani. A jobb part közel 50 m magas löszfalról ereszkedik le az út a bal part alföldi szintjére. A 10 m bevágással is 40 m a szintkülönbség a két hídfő között. A jobb parton a legtöbb támasz

közel 30 m magas, míg a bal parti 18 jelű alig magasabb 10 m-nél. További kötöttséget jelentett, hogy a pillérek vízbe kerülő részeit gerendaszerűen kellett kialakítani a lehetséges uszadékok, illetve az esetleges jégnyomás miatt. Így az egyes támaszok pillérmagasságainak aránya az 5:1 értéket is elérte. Az egységes megjelenéshez hozzátartozik, hogy a mederpillérek formája sem különbözhet teljesen az ártéri pillérek alakjától. Ezek a pillérek pedig egyszerre támaszkodik az ártéri hidak két felszerkezete, egymáshoz viszonylag közel, a pillér közepétől jobbra és balra 4,95 m, illetve 10,45 m távolságra, és a mederhíd a pillér tengelyétől 17,10 – 17,10 m távolságra. Tehát a pillér alátámasztó szerepe a mederhíd alatt a híd szélén, az ártéri hidak alatt pedig a szekrénytartók gerincei alatt, a híd hossz-tengelyéhez sokkal közelebb szükséges. Ezt a funkciót legjobban közelítő geometriát altervezőnk, a Kertész Építész Stúdió Kft. találta meg, a kosárívекből szerkesztett szilvamag



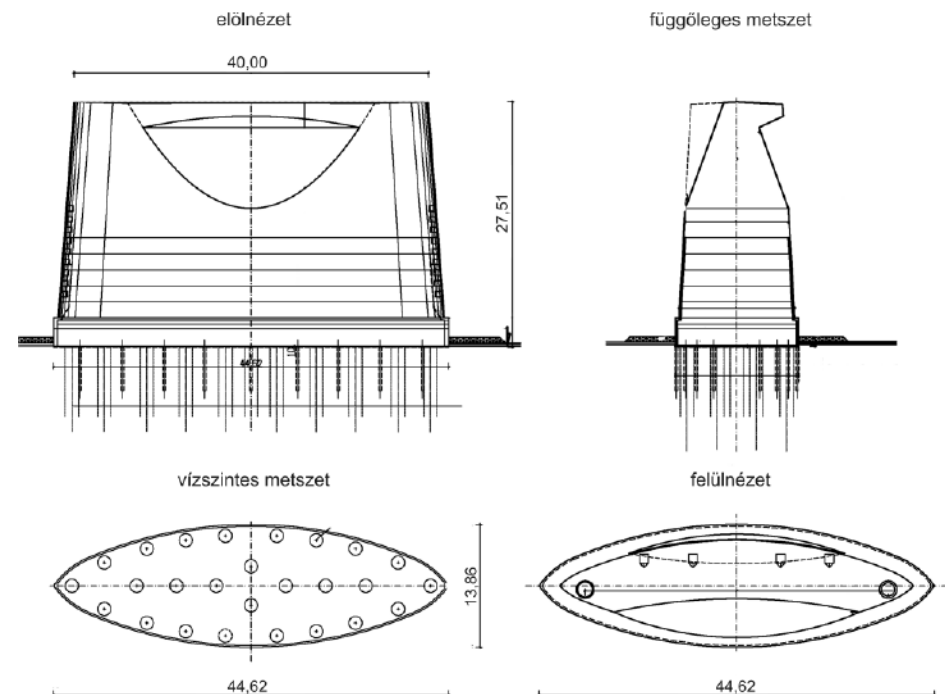
7. ábra • Feszültségek a kábellehorgonyzó cső környezetében, az ívben

keresztmetszetben. A mederpillérek szilvamag alakját vittük át az ártéri pillérekre is.

A mederpillérek – a 14 és 15 jelű támaszok – (8. ábra) szilvamag alaprajzú, tömör vasbeton pillérek, oldalfelületük kb. 18:1 dőlésű kúppalást, amelybe a 100,00 mB. f. szinttől felfelé mindkét oldalról egy-egy csúcsával lefelé fordított, függőleges tengelyű kúp metsz bele. Az ártéri hidak sarui a pillér metszett felületéből kinyúló rövidkonzolon állnak. A konzol úgy alakul ki, hogy az előbbiekben leírt csonkoló kúpot egy újabb kúppal visszametszjük. A két kúp tengelye egybeesik. A pillérek felső síkja 5 %-ot lejt kifelé. Az ártéri hidak felőli felső él a talpgerenda keresztirányú tengelyére szimmetrikusan három, egymáshoz érintőlegesen csatlakozó körívűből áll: a középső körív sugara 45,3 m, amelynek két végéhez egy-egy 7,30 m sugarú

ív csatlakozik. A mederhíd felőli felső élet, az előzővel azonos kontúrvonalból, a csonkoló kúp metszi ki. A kúpmetszések nem csupán esztétikai célt szolgálnak, hanem jelentős betontömeget is megtakarítanak. A pillérek alsó vonala a – csonkítatlan – felső peremmel koncentrikus körívекből áll. A pillérek két – befolyási és kifolyási oldali – élét a 100,00 mB. f. szintig egy sor szélességű, kötésben rakott, kopás- és fagyálló, gránit anyagú orrkő falazat védi. A pillérek magassága eltérő: a jobb parti (14 jelű) 25,0 m, a bal parti (15 jelű) – a híd 1,46 %-os lejtése következtében – 20,5 m, a víz alatti beton felső síkja felett.

Az alkalmazott hídsaruk, a szokásos követelményeken túlmenően, meg kell feleljenek a földrengésből adódó igénybevételeknek is. Az egyedi tervezésű saruk teherbírása tette lehetővé az erősen szeizmikus területeken



8. ábra • A 14 jelű mederpillér nézeti és metszeti rajzai

szokásos különleges berendezések beépítésének elhagyását. A mederhídon a 14 jelű pillér befolyási oldali saruja fix, a kifolyási oldali saru keresztirányban elmozduló kialakítású. A 15 jelű pillér befolyási oldali saruja hosszirányban mozgó, a kifolyási oldalon minden irányban elmozduló saru van. A jobb ártéri hídszerkezetek fix sarui a 8 jelű pilléren, a híd-tengely melletti „magas” főtartó gerincek alatt helyezkednek el. A többi belső saru hosszirányban elmozduló. A külső saruk közül a 8 jelű pilléren levő hosszirányban fix, keresztirányban elmozduló, a többi külső saru minden irányban elmozduló. A bal parti ártéri szerkezetek fix sarui a 17 jelű pilléren vannak, a többi saru elrendezése a jobb parti elrendezés rendszerének felel meg.

A híd dilatációi a hídfők és a mederpillérek felett vannak, kialakításukat tekintve fésűs, gumicsatornás szerkezetek. A mederpillérek felett a jobb és bal pályát önálló hidakon átvezető ártéri szerkezetek az osztatlan felszerkezetű mederhíddal csatlakoznak. A saruelrendezésnek megfelelően itt számottevő keresztirányú elmozduláskülönbség is jelentkezik a mederhíd és az ártéri hidak felszerkezetek között. Ennek lehetővé tételében is előnyös a fésűs dilatációs szerkezet.

A híd vízvezetésének tervezésekor a Közép-Duna-völgyi Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség előírta, hogy az összegyűlő vizek akkor vezethetők közvetlenül a folyamba, ha megakadályozható az élővíz szennyezése. A víznyelőkbe ezért egy magyar fejlesztés eredményeként szabaddalmaztatott olajsűrű betéteket terveztünk elhelyezni. Ezzel elhagyható volt a nehezen kezelhető, fenntartási szempontból kedvezőtlen, költséges gyűjtőcsatorna kiépítése a híd teljes hosszában, a dilatációkon átvezetve. A 17–21 m-enként az útpályán és a járdán elhelye-

zett víznyelőket csak ott köti össze gyűjtőcsatorna, ahol az áthidalt terület vagy a támaszok védelme azt szükségessé teszi (szeméttelp, árvédelmi töltés, pillérek melletti víznyelők).

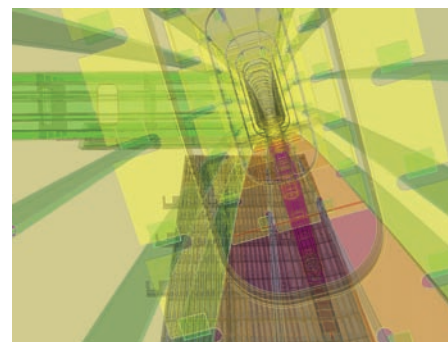
A hídon levő gyalogoskorlát a mederhíd ívszerkezetével harmonizál, külső éle az ív dőlésével párhuzamos. A biztonsági okokból is befelé döntött korlát oszlopai hegesztett T-, vízszintes elemei csőszelvényűek. Ezeket a korlátokat a Kertész Építész Stúdió Kft. tervezte.

A híd éjszakai látványa és a biztonságos közlekedés érdekében teljes hosszban útvilágítás is létesült. Az oszlopok a korláthoz hasonlóan, az ívek dőlésével azonos szögben, az útpálya felé döntöttek. A hajózási útvonal határait jelzőfények mutatják. Az ív nagy magassága miatt repülési jelzőfények beépítése is szükséges volt. Az ártéri szerkezet szekrénytartójában, a mederhíd ívtartójában, merevítő tartójában, végkereszttartójában és ívátkötő gerendáiban belső világítás épült ki.

A tervezés

A hazai gyakorlatban eddig nem alkalmazott, ráadásul a világon eddig megépült legnagyobb támaszközü kósárfülves szerkezetnél mintegy 60 m-rel nagyobb támaszközü híd megtervezése elképzelhetetlen lett volna a legfejlettebb technikát jelentő statikai és acélszerkezeti konstrukciós számítógépi programok alkalmazása nélkül. Mintegy tízezer (ebből közel három-ezer különböző) lemezből több mint háromszáz különböző gyártmányt állítottak össze a tervek alapján! (9. ábra)

A mederhíd méretezéséhez három különböző szoftvert használtunk, megbízhatóságuk, alkalmasságuk szerint az adott feladathoz igazodva. A globális vizsgálatokat héjmodelleken (10. ábra) és héj-rúd vegyes modelleken végeztük el. A különböző szerkezeti részleteket rúdmodellbe ágyazott, nagyon finom

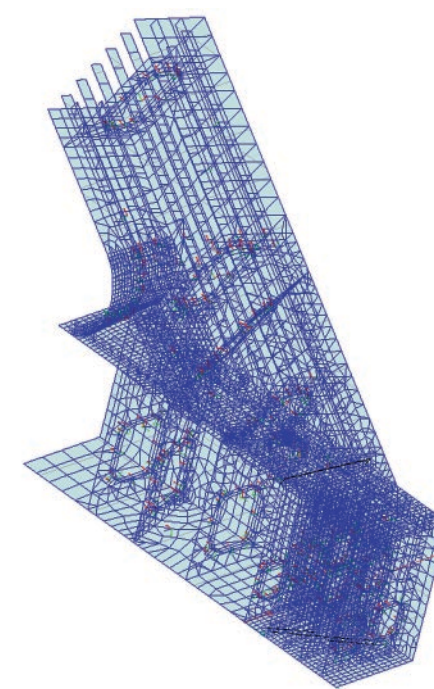


9. ábra • A mederhíd háromdimenziós acélszerkezeti tervének részlete



10. ábra • A mederhíd háromdimenziós végeselemes számítási modelljének részlete

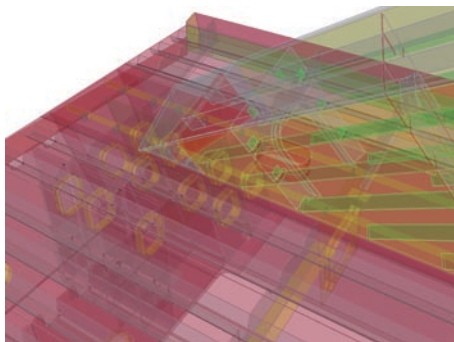
osztású héjmodellel számoltuk. Ezek közül ki kell emelni az ívtartó-merevítő tartó csomópont (11. ábra) ellenőrzését, valamint a saru és az ívtartó-merevítő tartó csomópont emelési hely feletti szerkezeti elemek vizsgálatát. A részletes számítás azt mutatta, hogy a feszültségi trajektóriák átfordulása az ív- és a merevítőtartók között döntően a gerincekben történik meg. Az ívtartó felső övének a tehermentesülése lehetővé tette a csatlakozó, saru feletti diafragmarendszer letisztult és statikailag is helyes megoldását (12. ábra). A fellépő, a hazai gyakorlatban még elő nem fordult, rendkívül nagy reakcióerők miatt részletes vizsgálatra szorult a saruhely és az emelési hely környezete is, egyaránt figyelembe véve a gyártás és az ellenőrizhetőség szem-



11. ábra • Az ív- végkereszttartó-merevítő gerenda csomópont számítási modelljének végeselemes hálózata

pontjait. A rezgésvizsgálatokhoz rúd- és héjmodelleket egyaránt használtunk. A sokszor rendkívül bonyolult, összetett erőjátékú csomópontok vizsgálata, és az úttörő jellegű, valószínűleg előzmények nélküli, nagyon nagyméretű feladat számításában a felépített végeselemes modellek és szoftverekbe beépített programeljárások tesztelésének ideje legtöbbször meghaladta magának a szerkezetnek a számítási idejét.

A híd beúsztatás közbeni állapotát szintén két modellen, rúd- és héjmodellel vizsgáltuk. A rugalmas hídszerkezet szintén rugalmas állványokon keresztül adta át terhét a hajlékony, vízben úszó bárkákra. A rendkívül összetett, bonyolult szerkezetegyettes igénybevételeit és feszültségeit nemlineáris számítással kellett



12. ábra • A saru fölötti csomópont háromdimenziós acélszerkezeti tervének részlete

és lehetett számítani. Az óriási kockázat miatt a számítási eredményeket a bárkák próbaterhelésével is ellenőriztük. A mederhíd acélszerkezeti terveit háromdimenziós acélszerkezeti tervező programmal készítettük el.

Az ortotrop pálya tervezését a BME szakemberei hazai hatályos szabályzatok szerint hajtották végre. Az adott időszakban az Eurocode vonatkozó fejezete többször is megváltozott, ezért részletes vizsgálatot végeztek a pályalemez szükséges vastagságának meghatározására. A BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén – a feszültségkoncentráció meghatározása alapján – végrehajtott vizsgálat szerint a pályalemez vastagságának növelése nem volt indokolt.



13. ábra • A Shinhamadera híd elszállítása a szerelótérrel (Oszakai-öböl, Japán)

A tervezés különleges feladata volt a tervezett geometriát eredményező feszítési terv elkészítése. Olyan számítási algoritmust dolgoztunk ki, amellyel a kivitelezés során gyors ellenőrzéseket tudtunk végrehajtani, gyors választ tudtunk adni a felmerülő kérdésekre. A végrehajtáshoz időben közeledve többször kellett a tervet átdolgozni annak megfelelően, hogy a vállalkozó folyamatosan aktualizált építési ütemtervéhez alkalmazkodjék: a kevesebb művelet, tehát rövidebb feszítési idő, vagy a pályát alátámasztó támszközeli cölöpök minél korábbi kivételi lehetősége, vagy ezek kombinációja teszik lehetővé a híd legkorábbi beúsztatását.

A megvalósítás

A létesítmény megépítésének talán legkényesebb, legveszélyesebb művelete volt a mederhíd beúsztatása a szerelótérrel végleges helyére. A művelet során az úsztatandó tömeg mintegy nyolcszorosa volt az eddig hazánkban úsztatott legnagyobb hídtömegnek. A végleges alkalmazott technológia megtervezésekor figyelembe kellett venni, hogy a beúsztatás folyóvízben, nem pedig tengerben (például Japánban [13. ábra]), illetve szabályozott csatornában történik, a hazai kivitelezők rendelkezésére álló eszközökkel és eljárásokkal. A tervezési koncepció rögzítése ezért a FŐMTERV Zrt., a BME, a Hídépítő Speciál Kft. és a GANZACÉL Zrt. mérnökeinek szoros együttműködésével történt.

A bal parton, részben a mederben, részben a parton acélcső cölöpökből építették ki a mederhíd felszerkezetének szerelótérét. A felszerkezet majdani ideiglenes támsz helyeire, azaz a szerelótér négy sarkába, négy-négy fúrt vasbeton cölöpöt készítettek, melyek tetejére vasbeton lemez épült. Ezt a négy támszt úgy kellett kialakítani és méretezni,

hogy a felszerkezetet rajtuk több mint 7 m magasba fel lehessen emelni. A szerelótérrel észak–déli irányban kezdték meg a pályaszerkezet szerelését. Az építési idő csökkentése érdekében a szerelést a déli oldal irányából is megindították. Ezután, még a pályaszerkezet elkészülte előtt, indult meg az ívek szerelése. A szerkezetek a terhelés hatására alakváltoznak, ezért a szerelt alak eltér a végleges állapotban megkívánt alaktól – a számított lehajlás értékével magasabbra, túlemelve építik meg őket. A Pentele híd ívét közepén 70 cm-rel kellett túlemelni, ennyit hajolt le kiállványozása után és a kábelek megfeszítése során. A szerelés befejezése után, a kábelek megfeszítésével emelték fel a pályát a szerelőjármokról. Ezt a műveletet rendkívül részletes tervezői előkészítés után, az egymást követő technológiai lépéseket és azok hatásait külön bemutató

technológiai utasítás birtokában hat hét alatt végezték el (a gyakorlatban hat hónap sem meglepő átfutási idő – kisebb hidaknál). A híd alakja és a kábelerők a számításnak gyakorlatilag tökéletesen megfeleleltek. Ezután a hidat a saruhelyek alá épített emelőjárom segítségével megemelték. A támszok közelébe öblöket kotortak a bárkák számára. Az állványokat hordó bárkacsoportok behajózása után kezdődött a legkényesebb művelet, az átterhelés a bárkacsoportokra (14. ábra).

A felszerkezetet a művelet végrehajtása során a véglegestől alapvetően eltérő megtámsztási módból adódó igénybevételek miatt meg kellett erősíteni. Ezt egyrészt ideiglenes rudak beépítésével, másrészt a szerkezet szelvényeinek erősítésével, merevítésével hajtották végre. Az erősítő rudazat (15. ábra) – a több változaton végzett számítás eredményeképp-



14. ábra • A mederhíd felvétele a bárkákra (2006. december 5.)

pen – ív-főtartónként mindkét végen 2-2 merev végcsomópontú, az 1–2 kábelek között elhelyezett, továbbá egy síkjában csuklós végcsomópontú (16. ábra), a 2-3. kábelek közé beépített, szekrény keresztmetszetű rúdból állt.

A tervezés különleges feladata volt a közel 20 000 kN (!) nyomóerővel terhelt csuklós rúd erőbevezetésének megoldása a merevítő tartó gerincébe, továbbá a nyomóerő terítése a rúd teljes keresztmetszetébe. A közelítő számítás alapján kidolgozott konstrukciót ezért síkhéjelemekből felépített modelleken ellenőriztük, a hazai előírások hiányos volta miatt részben az Eurocode előírásai alapján. Az ívtartók, merevítő tartók és hossztartók egyedi igénybevételek miatti szelvényerősítése mellett szükség volt a merevítő bordázat erősítésére, illetve meghosszabbítására is.

A merevítő tartót, az alkalmazott bárkák geometriai adottságához igazodva, a hídvégek közelében 2×8 ponton, az 1-2. kábelek közötti mezőben levő kereszttartóknál, továbbá a szomszédos 2-2 diafragmánál támasztották alá (17. ábra). Az előzetes statikai vizsgálat azt az eredményt adta, hogy a gerinc behorpadása csak akkor küszöbölhet ki biztonsággal, ha a teherátadás egyenletes, azaz egy ponton a híd súlyának $1/64$ része terheli az alátámasztást. Ez önmagában az állványzat rugalmasság, illetve rugalmas betétek révén nem megvalósítható. Az alátámasztás két szélső pontja fölött a merevítőtartó függőleges síkú alakváltozásának különbsége 240 mm. Ennek az alakváltozásnak kellett úgy szabadon megtörténnie, hogy közben minden pontban azonos erő ébredjen a megtámasztási pontokon. Ennek érdekében, a GANZACÉL Zrt. javaslatára, hidraulikus sajtókból kialakított ágyazat alkalmazása mellett döntöttünk.



15. ábra • Ideiglenes merevítő rudak a bárkák alátámasztott mederhídiban. Hozzánk legközelebb a csuklós bekötésű rúd

A beúsztatáshoz alkalmazott TS-bárkák, az alátámasztó állványzat és a híd statikailag sokszorosán határozatlan rendszert alkotnak. Ezért, a szokásos statikai vizsgálaton túlmenően, olyan komplex modellen hajtottunk végre ellenőrzést, amely képes volt figyelembe venni a bárkának, részelemeinek, így kiemelten a bordáknak és a válaszfalnak, az állvány



16. ábra • A csukló a pályalemez fölött

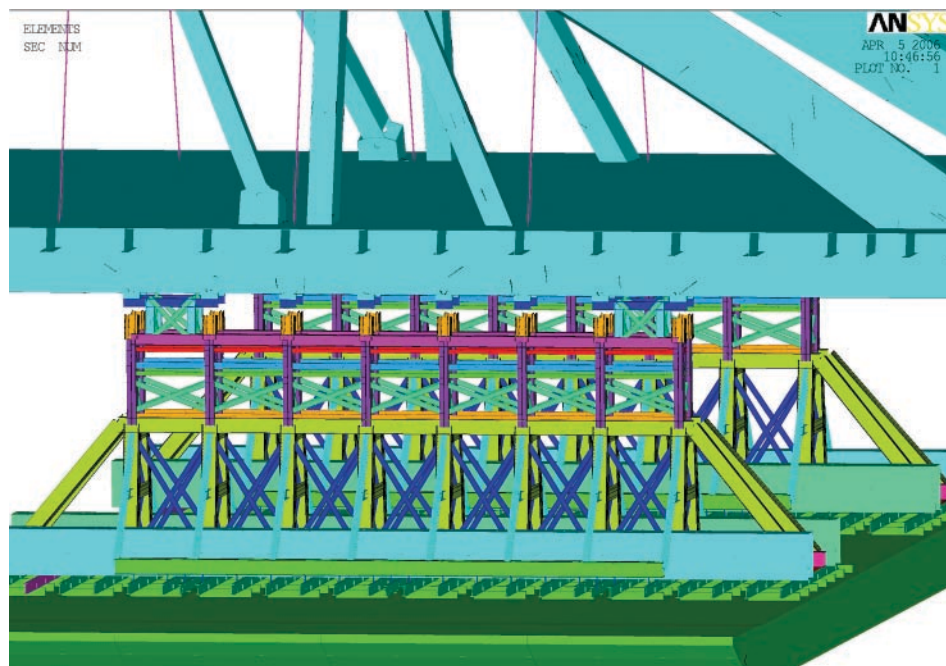
alkotórúdjaiknak és az azt összekapcsoló teherelosztó fabetéteknek, továbbá a hídszerkezetnek a tényleges merevségi viszonyait. A szokásos számítások mellett érzékenységvizsgálatot is végeztünk. Ennek során számításal követtük a teherátadás folyamatát. Elemeztük az esetleges véletlenszerű hatások következményeit – például valamelyik bárka lékesedése, a híddal terhelt úszó bárkák ütközése tetszőleges irányban –, mind a hídszerkezeten, mind a bárkákon. (18. ábra) A vizsgálat célja volt megállapítani a kivitelezőnek megadandó tűréshatárokat, feltárni a kockázatos helyzeteket és mindezekre megoldási javaslatot adni. A vizsgálatok azt mutatták, hogy a szerkezetegyettesnek több kritikus pontja és kritikus állapota van a napokig tartó művelet során, de a technológiának mindig megadható egy reális tűréshatár, melynek betartásával híd tönkremenetele megelőzhető.

A közel fél évig tartó, heti rendszerességgű egyeztetés mellett folyó tervezés végeredményeképpen alakult ki az alkalmazott megoldás. E szerint a TS-bárkák bordáira a merev állványzat puha- és keményfa alátétek speciális kombinációjával támaszkodott. Az állványzat tetején hídvégenként egy közös körre kapcsolt hidraulikus rendszer biztosította, hogy valamennyi támaszkodási ponton azonos nagyságú reakcióerő keletkezzék. A bárkák teherbírásának és a teljes teherátadó, teherelosztó rendszerrel alkalmazott számítási eljárás helyességének igazolására próbaterhelés is történt (19. ábra). A mért feszültségek a leginkább igénybe vett elemeknél jó egyezést mutattak a számítottakkal.

A rendkívül kényes teherátadási művelet kézbentartására eredetileg nyúlásmérő bélyegek felragasztását és ezzel a szerkezet, az ideiglenes merevítőrudak és a bárkák kényes pontjai



17. ábra • A bárkákra épített állvány, a híd egyik sarka közelében, 16 ponton támasztotta meg a merevítő gerendát



18. ábra • A bárka-állvány-híd együttes szerkezet háromdimenziós modelljének részlete

feszültségállapotának folyamatos figyelését terveztük. Az előkészítő munkák azonban elhúzódtak. A következő hétre viszont kedvező időjárást jósoltak. Számításaink szerint ugyanis 20 km/h-nál kisebb szélesség volt csak megengedhető a horgonyok korlátozott teherbíró képessége miatt, a Duna vízszintje is éppen meghaladta a bárkák merüléséhez szükséges legkisebb értéket, a csapadéktelen ősz miatt pedig inkább apadás volt várható. A kedvező körülmények elmulasztásával több hónapos késedelmet kockáztattunk volna, így a mérőrendszer elkészítésére nem maradt idő és lehetőség. A gondos előkészítés és a kábelfeszítés során tapasztalt kiváló egyezés a számítás és a mért adatok között kellő alapot szolgáltatott a munka sikeres elvégzésére, ezért hozzájárultunk a beúsztatási művelethez. A teher átvétele másfél napi megfeszített munkával sikerült. A híd a következő napon, 2006.

december 6-án, szerdán behajózott a pillérek elé. A szükséges segédberendezések átszerelésére a kedvező időjárás miatt két napot fordítottak a tervezett néhány órával szemben. Ekkor azonban már a meteorológiai előrejelzés szerint sűrűn le kellett tenni a hidat a várható viharos szél miatt. A szintén hihetetlenül kockázatos első három-négy órai művelet sor tökéletes sikerrel zajlott le. Ekkor a tervezői csapat – egy fő kivételével – elindult hazafelé. Útközben ért minket a hír, hogy az egyik támasz fölött, a megtámasztott lemez és a támasz között rés nyílik. Azonnal leállítottuk a műveletet. Éjjel fél kettőig tartó számításokkal igazoltuk, hogy a tervezett állapot ilyen tönkremenetelre nem vezethet. A hajnali munkakezdetkor ismét sajtókra emelték az érintett támaszt, s a minimális hézag változatlansága igazolta ezt az eredményt. A lemez nem volt ideálisan sík, a hézag eredeti-



19. ábra • A bárkák próbaterhelése

leg is megvolt, egyáltalán nem tágult. A lemezhorpadás veszélye egy pillanatra sem állt fenn. A híd letétele néhány órán belül sikerrel befejeződött. Az ideiglenes merevítő rudakat napokkal később gyakorlatilag feszültségmentesen tudták kivenni, ami igazolta, hogy a szerkezet épségben, maradó alakváltozások nélkül viselte remélhetően hosszú életében előforduló legnagyobb igénybevételt.

A jobb parti ártéri hidak 1068 m hosszú szerkezetei egyedülállóan hatékony, újszerű technológiával valósultak meg: a Duna felől, szakaszos előretolással épültek (20. ábra). A kb. 17 m hosszú, teljes keresztmetszeti szélességű szerelési egységeket úszódaru emelte a 13 és 14 jelű támaszok között kialakított segédjáromra, ahol teljes keresztmetszetben illesztették őket. Innen indult a tolás az 1 jelű hídfő irányába. A szerkezet elejét ún. vendég-híd támasztotta meg. A BME Hidak és Szerkeze-

tek Tanszéke tervezte vendég-híd kéttámaszú rácsos tartó volt, melyet mindig előretoltak a következő nyílásba, ha a felszerkezet eleje közel 34 m hosszban túlhaladt a következő támaszon. Ezután akasztotta fel rá a felszerkezet elejét, és folytatta annak kitolását a GANZ-ACÉL Zrt. Az összehangolt sajtók folyamatos tolásával a technológia hallatlanul gyorsnak és hatékonyan bizonyult: kellő gyakorlati idő után 12 m/h átlagsebességet értek el. A bal parti ártéri hidak szerelésénél további két, önmagában nem különleges építéstechnológiát alkalmaztak.

A mederhíd alépítményének építésénél kéregelemeket gyártottak, és helyeztek a folyóba, hogy száraz munkaterületen tudjanak dolgozni. Ilyen technológiával már épült híd Magyarországon, Ausztriában és Németországban, de ekkora méretű előregyártott elemekkel még – ismereteink szerint – nem. A leg-



20. ábra • A jobb parti ártéri hidak felszerkezetét rácsszerkezetű gerenda, ún. vendéghíd segítségével, szakaszosan előretolva építették.

nagyobb is a negyede volt az itt használt elemeknek. A 42 m hosszú, 14 m legnagyobb szélességű, 1,80 m magasságú, 0,20 m falvastagságú, szilvamag alakú kéregelemeket egy úszódaru emelte föl, és szállította a helyére (21. ábra). Az emelési kapacitás korlátai miatt, a kéregelemek nemcsak munkagödörhatároló szerkezetek voltak, hanem egyben bentmaradó zsalui is a mederpillérek alsó részének. A szilvamag alakú kéreg rendkívül karcsú falának stabilitásvesztését acél merevítőszervekkel akadályozták meg.

Összefoglalás

A mederhíd kéttámaszú, kábelekkel függesztett merevítőgerendás, kosárfül elrendezésű ívhíd. Támaszköze 307,9 m, jelenleg a vilá-

gon a legnagyobb ebben a kategóriában. Az eddigi legnagyobb hasonló szerkezet a japán Shinhamadera híd volt, melynek támaszköze 254 m. A híd egyben Európa harmadik legnagyobb támaszközü acélszerkezetű ívhídja is. Magyarországon itt terveztek, és alkalmaztak először S460 szilárdsági osztályú, termomechanikusan hengerelt acél hídszerkezetet.

Figyelemreméltó, ahogy a 87 000 kN súlyú szerkezetet egyben, bárkákon úsztatták végleges helyére a bal parti szerelőről. Ismereteink szerint, folyami viszonyok között, ekkora és ilyen tömegű hidat még nem úsztattak. A tengerekhez képest korlátozott merülési lehetőség miatt a folyón nincs olyan szállítójármű, ami eleve alkalmas lenne ekko-

ra tömeg, főleg koncentrált erőátadású tömeg szállítására – állványokkal együtt kb. 105 000 kN súlyt vittek a bárkák. A bárkák szempontjából szükséges teherelosztás érdekében a hidat sok ponton kell alátámasztani, ami a híd nagymértékű alakváltozása miatt igényelt rendkívül gondos számításokat és különleges intézkedéseket. Az erőbevezetés egyenleteségét a merevítőtartóba, és emellett a szerkezet szabad alakváltozását hidraulikus ágyazattal lehetett elérni.

A dunaujvárosi Duna-híd építésénél nagyon változatos építéstechnológiákat alkalmaztak. A mederhíd felszerkezetének gyártása és szerelése – beleértve a kábelek befűzését és feszítését, a híd parti, majd pilléreken történt emelését és az úsztatást – a kivitelezés alatt folyamatosan új kihívások elé állította a kivitelező és az azt segítő tervező csapatot. Az ártéri hidak felszerkezeteinek szerelésénél négy különböző technológia szerepelt. Az építés-



21. ábra • A mederpillérek építésénél használt egyik kéregelem áthelyezése a gyártótéren



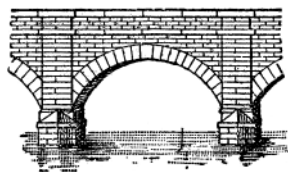
22. ábra • Az elkészült híd

technológiák tervein a tervezők és a kivitelezők a kivitelezés során végig, folyamatos együttműködésben dolgoztak.

A Pentele híd tervezésében és kivitelezésében a magas szintű mérnöki tudás és a felkészült, gondos kivitelező ötletes, hatékony technológiája működött együtt. Fiam, Hor-

váth Ágoston szerint: *ha valaki valami újat alkot, Isten végtelen tervének kis darabját valósítja meg.* Talán ennél a hídnál is ez történt.

Kulcsszavak: *Pentele híd, ívhíd, acélszerkezet, vasbeton alépítmény, beúsztatás, tervezés, építéstechnológia*



APOLLO, A POZSONYI ÚJ DUNA-HÍD

Miroslav Maťaščík

főmérnök
Alfa 04 Tervezőhivatal, Pozsony

Agócs Zoltán

PhD, egyetemi tanár, mérnök
Szlovák Műszaki Egyetem Építőmérnöki Kar, Pozsony
agocs@svf.stuba.sk

Bevezetés

Egy híd koncepciójának kidolgozásánál az építőmérnök szempontjából a funkcionális követelmények az alapvetőek. Ezeket a követelményeket a közlekedési szakember és az idetartozó szabványok határozzák meg. Továbbá figyelembe kell venni a különleges peremfeltételeket: a híd lokalitását, a közeli létesítményeket és a közeljövőben tervezett építményeket, ezek alakját, magassági szintjét, az alapozás lehetőségeit, valamint az új híd hatását a környezetre.

A jelentékeny, korszerű, főleg nagy fesztávolságú hidak korunk fejlettségéről tanúskodnak. A jövő generációk aszerint is ítélnék meg majd bennünket, hogy milyen hídszerkezeteket hagyunk rájuk. Ezért a tervezők közös célja olyan hidat tervezni, amelynél összhangban van a célszerűség, a biztonság, a gazdaságosság, az esztétikai megjelenés, és amely megfelel a környezetvédelmi követelményeknek.

A híd tervezése csapatmunka, ennek ellenére hosszú időn, talán évszázadokon keresztül az építőmérnök-statikus szerepe volt domináns. Fokozatosan kialakult azonban az

vélemény, hogy a vizuálisan fontos, főleg a látványos városi hidak tervezéséhez már a munka kezdetén meg kell hívni az építész is. Ma sok esetben lehetünk tanúi annak, hogy az építész esztétikai követelményei – az építőtő beleegyezésével – túlnőnek a funkcionális és statikai szempontokon.

Napjainkban, a számítógépek világában, a legösszetettebb szerkezet statikai számítása sem jelent problémát. A szerkezetet azonban ma is előre ki kell találni, és el kell képzelni a legapróbb részleteiben.

Az építőmérnök és az építész közötti sikeres alkotói együttműködés jó példája a pozsonyi ferdekábeles aszimmetrikus Duna híd (mai neve Új híd), amely egyedülálló mérnöki alkotás, ugyanakkor magas esztétikai követelményeket is kielégít. 1972-ben adták át a forgalomnak. Ma ez a híd a szlovák főváros újkori szimbóluma, és sok külföldi szakember a világ emlékművei közé sorolja. Az acélszerkezetet tanszékünk tervezte Árpád Tesár professzor vezetésével, az építészcsoporthoz Jozef Lacko professzor vezette (1. ábra). A pozsonyi új Duna-híd Szlovákiában a 20. század legsikeresebb mérnöki alkotása címet viseli.