

# A FÜGGESZTŐKÁBELEK KIALAKÍTÁSA ÉS MÉRETEZÉSÉNEK ALAPELVEI FERDEKÁBELES HIDAKNÁL

*Hunyadi Mátyás\* - Farkas György\*\* - Völgyi István\*\*\**

## RÖVID KIVONAT

A nagy fesztávolságú hidakat manapság szinte kizárólag függesztett vagy ferdekábeles szerkezeti rendszerrel építik. A kábelek kiválasztása, tervezése és beépítése mindkét híd típusnál fontos tényező. Ezek kialakításának fontosabb szempontjait ismerteti a cikk.

Magyarországon hamarosan két nagy támaszközű híd építése kezdődik meg. Dunaújvárosban egy 307,80 m támaszközű kábelekkel felfüggesztett ívhíd készül, míg az M0 autópálya északi szakaszán a fő Duna-ág fölött épül Magyarország első, 300 m támaszközű ferdekábeles hídja. A Tanszék mindkét híd tervezésében közreműködött, társ tervezőként illetve független statikai ellenőrként.

## 1. BEVEZETÉS

A ferdekábeles és függesztett hidak kábeleinek kiválasztása fontos tényező a műtárgy tervezése során. E cikk a választás elősegítése érdekében a kábelek típusait ismerteti.

Elsősorban a kábelek keresztmetszeti kialakításával és azzal összhangban az alkalmazás lehetőségeivel foglalkozunk. A kábeleknek a többi szerkezeti elemhez való csatlakoztatására a lehorgonyzó berendezéseket alkalmazzuk. Ebben kapnak helyet a kábel szempontjából egyéb fontos elemek, a deviátorok és csillapító berendezések. A kábel rezgéseinek csillapítása a meteorológiai terhek okozta dinamikus hatások minimalizálására szolgál, mely dinamikus igénybevételek elsősorban a szél, illetve a szél-esővíz közös hatásaiból keletkeznek.

Végül ismertetjük a méretezési módszereket, a kábel modellezésének szempontjait, valamint foglalkozunk a tervezett élettartammal és a kábelek karbantartásának kérdésével.

---

\* okl. építőmérnök, tud. segédmunkatárs, Tartószerkezetek Numerikus Mechanikája Kutatócsoport

\*\* okl. építőmérnök, Dr. habil, egyetemi tanár, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

\*\*\* okl. építőmérnök, doktorandusz, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

## 2. A KÁBELEK TÍPUSAI

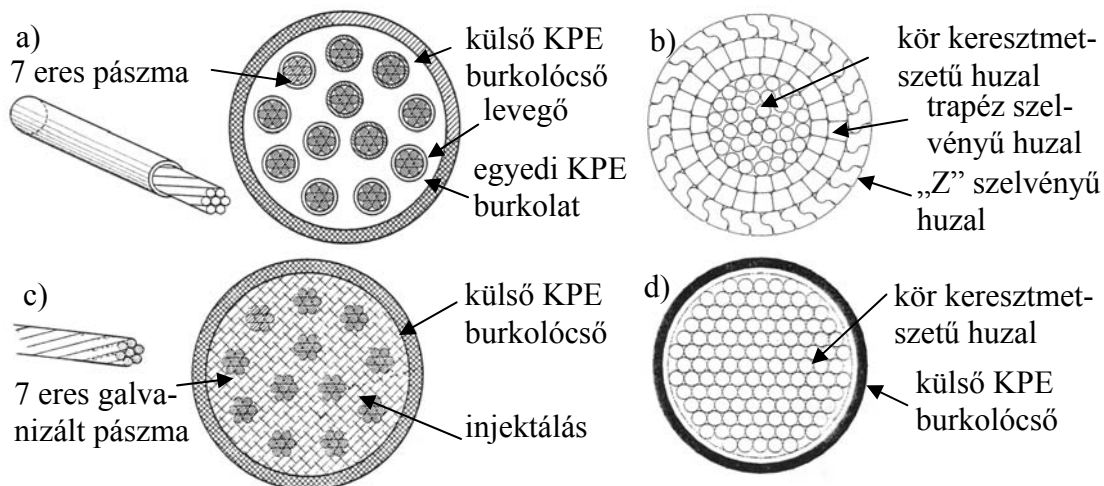
### 2.1. A keresztmetszet szokásos anyagai, kialakítása

A kábelek keresztmetszeti kialakítása a következő lehet:

- kör keresztmetszetű huzalokból sodort kábel,
- párhuzamos kör szelvényű huzalokból vagy pászmákból kötegelt kábel,
- pászmákból sodort kábel,
- kör, trapéz és „Z” szelvényű huzalokból készült zárt kábel.

Mindegyik keresztmetszeti megoldásnak vannak előnyei és hátrányai is. A keresztmetszet helyes megválasztása fontos a műtárgy tervezése során, mivel az hatással van a szerkezet részletterveinek megoldására, a szerelési technikára, valamint a rendszer erőjátékára is.

A keresztmetszeti kialakítások csak a kábelben lévő huzalok elrendezésében térnek el. Ez alól kivétel a „Z” szelvényű huzalokból készült kábel. A huzalok elrendezése, zártsága és menetemelkedése nagyban befolyásolja a teljes kábel látszólagos rugalmassági tényezőjét.



1. ábra: a) gyárilag egyedi burkolattal rendelkező pászmák párhuzamos vezetése  
b) zárt kábel kör és „Z” szelvényű huzalokból  
c) zsírral injektált pászmás kábel  
d) párhuzamos, kör szelvényű huzalokból kötegelt kábel

A zárt kábel a zártsága miatt jó korrózió elleni védelemmel rendelkezik, míg a huzalokból vagy pászmákból álló kábel korrózió védelméről külön kell gondoskodni. Ennek egyik lehetősége a pászmákból sodort kábel esetén, hogy a pászmákat gyárilag saját burkolattal látják el. Az egyedileg burkolt pászmák alkalmazásának előnye, hogy további korrózió elleni védelem nem szükséges és, hogy a kábel szerelése a pászmák egyenkénti befűzésével történhet. A burkolat nélküli pászmák alkalmazása esetében viszont a pászmák közötti tér megfelelő védőanyaggal való kitöltésével, például injektálással kell gondoskodni a korrózió elleni védelemről.

A különböző kábelkeresztmetszetek alkalmazására példa a budapesti Erzsébet híd, melynek tartókötele párhuzamos vezetésű kábelekből készített kötegelt kötél, ahol a kábelek huzalokból és Z acélszelvényekből állnak, míg a híd függesztő kábeleit pászmákból sodort kábelek alkotják. Elsősorban ferdekábeles hidaknál szokás alkalmazni a burkolócsőben vezetett pászmákból álló kábeleket.

A kábelek anyaga szinte kizárólag nagyszilárdságú acél, 1300–1860 N/mm<sup>2</sup> névleges szakítószilárdsággal. Az utóbbi időkben épült néhány speciális kábeles híd, melyek kábeleit szénszálal anyagból készítették. Ezek a hidak azonban kísérleti jellegű kis műtárgyak, gyalogos átkelők.

A nagyszilárdságú acél rugalmassági modulusa 195 000 N/mm<sup>2</sup> körüli, de a teljes kábel rugalmassági modulusa a kábel keresztmetszeti kialakításától, a benne fellépő erőtől és a kábel hosszától függ. Ezt a későbbiekben részletesebben is ismertetjük.

## **2.2. A kábelek burkolata**

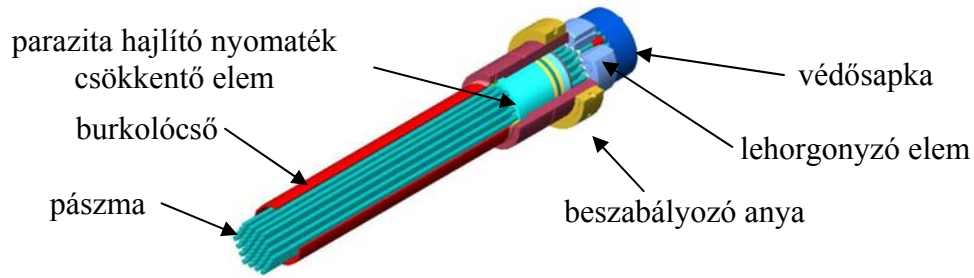
A kábeleket védelmi szempontból burkolattal kell ellátni. A burkolat lehet kemény polietilén (KPE) vagy acél burkolócső. Előfordul, hogy a kábeleket csak védőfeszítéssel fedik be. A külső burkolat ellenálló kell, hogy legyen a környezeti hatásokkal, többek között az UV sugárzással szemben.

Amennyiben a kábelt alkotó huzalok vagy pászmák csak galvanizáltak, külső saját burkolattal nem rendelkeznek, úgy a burkolócső és a pászmák közötti teret korrózió elleni védő anyaggal kell kitölteni. Ekkor elkerülhetetlen, hogy a burkolócső a kábel erőjátékában részt ne vegyen. Ezt a hatást azonban a szerkezet vizsgálata során figyelmen kívül kell hagyni és csak a cső méretezése során kell számításba venni. A tökéletes kitöltés érdekében a burkolatnak az illesztéseknél is teljesen zártnak kell lennie.

## **3. A KÁBELEK LEHORGONYZÁSA, FESZÍTÉSE**

Ferdékábeles hidaknál a kábelek lehorgonyzása két pontban történik; a merevítőtartónál és a pilonoknál. Mindkét helyen olyan lehorgonyzó blokkot kell kialakítani, amely képes átadni a kábelerőt a szerkezeti elemre. A lehorgonyzás lehet fix (vagy passzív), melynél a kábelt fixen rögzítik a feszítés előtt, valamint aktív, amelynél a kábel feszítése történik. Oldható lehorgonyzó blokk alkalmazása esetén a kábel az élettartama során utánfeszíthető, illetve cserélhető. Ehhez a kábel megfelelő kialakításáról gondoskodni kell. A kábel feszítőerejének utólagos beszabályozása a lehorgonyzás oldása nélkül is megoldható ún. utánállítható lehorgonyzó blokk alkalmazásával.

A kábel feszítése az aktív lehorgonyzásnál történik, ahol a feszítési művelet részére megfelelő teret kell biztosítani. Ennek a térnek a biztosítása alapvető szempont lehet az aktív lehorgonyzás helyének megválasztásánál, hogy a pilonban, vagy a merevítőtartóban legyen a lehorgonyzás.



2. ábra Lehorgonyzó berendezés tipikus felépítése

A kábel feszítésének több módozata van. Lehet a kábelt pászmánként, vagy egyidejűleg feszíteni. A pászmánkénti feszítés előnye a feszítőpuska kicsiny mérete, könnyű mozgathatósága. Ekkor viszont a feszítés egyenletességének biztosítása érdekében számítógép által vezérelt feszítési eljárást kell alkalmazni. A kábelek egyidejű feszítése egy nagy teljesítményű és méretű feszítőpuskával történik, amely számára biztosítani kell a kitámasztás, a felfüggesztés és a mozgatás lehetőségét. Előnye viszont, hogy a kábel egésze egy műveletben feszíthető meg.

A feszítés időbeli végrehajtásának több változata terjedt el. Lehet a kábelt egy ütemben, beszereléskor megfeszíteni a tervezett értékre. Ekkor ügyelni kell arra, hogy a feszítés időpontjában a szerkezet önsúlya nem egyezik meg a végleges önsúly teherrel. Ezt a feszítő erő megválasztásánál figyelembe kell venni. Ennek elkerülésére lehetőség van a kész szerkezet végső beállításakor a feszítőerő módosítására. Ekkor viszont a végleges feszítéshez a feszítő puskát újból végig kell vinni az összes lehorgonyzó blokkon. Végül lehetőség van a feszítőerő változtatására a műtárgy élettartama alatt is. Ennek szükségessége pl. egy felülvizsgálat során ítélni lehet. Itt jelentkezik az utánállítható lehorgonyzást lehetővé tevő lehorgonyzó blokk alkalmazásának előnye. Természetesen a kezdeti feszítés utáni feszítőerő módosítás csak oldható lehorgonyzó blokk alkalmazásával lehetséges.

A lehorgonyzó elemnél ügyelni kell a kábeleknél a blokkba való bevezetéséről. Itt a kábel belengése miatt keletkező parazita hajlítónyomaték minimalizálására kell törekedni. Ez adott esetben több szinten történhet. Mindegyik szinten a kábel további elhajlásának feszültség növelő hatásának kivédése a cél.

A merevítőtartón elhelyezett lehorgonyzó berendezés részét képezi az ún. vandálcső, amely megvédi a kábelt és a burkolócsövet a szándékos vagy véletlen, pl. bal-estből származó rongálódástól.

#### 4. DINAMIKUS HATÁSOK

A kábelek sokkal érzékenyebbek a dinamikus hatásokra, mint a statikus igénybevételekre, ezért a cikk terjedelmi korlátai miatt az utóbbival nem foglalkozunk.

A dinamikus igénybevételeket okozó hatások két nagy kategóriába sorolhatók; meteorológiai hatásokra valamint a hasznos terhek ingadozásából adódó terhelésre.

#### 4.1. A meteorológiai hatások

A kábeleket érő meteorológiai hatások lehetnek a szél, az eső, a jegesedés, valamint ezek kombinációja.

A szél a kábelek tengelyére merőleges irányban működő teherként jelentkezik. A kábel törekszik a szél torlónyomása elől kitérni, így mozgásra kényszerül. A kábelben, a mozgás következtében további igénybevételek keletkeznek, esetleg rezonancia léphet fel.

A szél hatását a kábel mozgásának függvényében a következők szerint osztályozzák:

- Széllökét, a szélirányban ható torlónyomás változásának hatása.
- Belebegés, amikor a kábel a szél irányára merőlegesen tér ki a torlónyomás elől. A kitérés hatással van a kábelt terhelő nyomásra, így azt vagy csillapítja (aerodinamikus csillapítás), vagy gerjeszti (rezonancia).
- Örvényleválás, amikor a kábel szélvédett oldalán leváló örvények a szél irányára merőlegesen hozzák mozgásba a kábelt.
- Több kábel esetében figyelemmel kell lenni arra is, hogy a kábelek lehetőleg ne kerüljenek egymás leváló örvényeibe, mert ez további gerjesztést okozhat.

A kábel külső kialakítása általában kör keresztmetszetű. A tökéletes kör keresztmetszet alaki tényezője igen kedvező, így ilyen kábelek esetén a szélből származó hatások elvileg minimálisak lehetnének. Esős időben viszont a burkolócső alsó élén lefutó vízcsorgás, vagy esetleg a rá fagyott pára megváltoztatja a tökéletes kör alakú keresztmetszetet, és a szélnek kitett keresztmetszet amorf alakot vesz fel. Ez rossz hatással van a kábel dinamikai viselkedésére, jelentősen megnöveli az igénybevételeket és a kábelt túlzott mértékű mozgásba hozza. Ennek megelőzésére speciális burkolócsővel látják el a kábelt, amelyen egy spirálisan kialakított horony megtöri a víz egyenes vonalú levezetését, és ezáltal a kedvezőtlen hatások elkerülhetők.



3. ábra Spirális vízvezető horony a burkolócső palástján

#### 4.2. Paraméteres gerjesztés

Az előbbieken a kábel tengelyére merőleges irányú hatásokat elemeztük. A kábel tengelyének irányában ható gerjesztő hatást paraméteres gerjesztésnek nevezzük. Ez a gerjesztés elsősorban a kábelre felfüggesztett pályalemez függőleges dinamikus terheléséből adódik. A kábel másik vége, vagyis amelyik vagy egy tartókötélbe köt be, vagy

a pilonban van lehorgonyozva, viszonylag rugalmasan van megtámasztva, így a paraméteres gerjesztés ezeknél a kábeleknél nem keletkezik. A paraméteres gerjesztés a hátrakötő kábelén mértékadó (ha van ilyen), ahol a kábel egyik vége a hídfőhöz fixen köt be, a másik vége pedig a mozgó pilonhoz kapcsolódik.

A paraméteres gerjesztés kialakulása nagy valószínűséggel elkerülhető, ha a kábel rezgési sajátfrekvenciája távol esik a merevítőtartó, ill. a pilon megfelelő sajátfrekvenciájának felétől.

### **4.3. A dinamikus hatásokból származó igénybevételek csökkentése**

A dinamikus hatások okozta igénybevétel növekedést két módon lehet csökkenteni. Egyrészt egyes hatások kialakulását el lehet kerülni, másrészt a belőlük származó igénybevételeket mérsékelni lehet.

Ferdekábeles hidaknál az előbbire példa a ferdekábelek egymáshoz való kikötése egy vagy több feszítőkötéllal. Ezáltal a kábelek mozgása az egymáshoz kötött keresztmetszetekben korlátozott. Ez megváltoztatja a kábel rezgési frekvenciáját, és ezáltal csökken a dinamikus hatások mértéke. Ez a megoldás esztétikailag nem mindig kedvező. Ilyenkor a hatások okozta igénybevétel többlet csökkentésével lehet próbálkozni, vagy esetleg a két megoldást együttesen alkalmazni.

Igénybevétel többlet a kábelben a dinamikus hatásokból elsősorban a lehorgonyzás környezetében keletkezik, mivel a kábel szabad mozgása ott van korlátozva. A parazita többlet feszültségeket a kábelek elhajlásának mérséklésével lehet csökkenteni, amit a kábel lehorgonyzó blokkjában elhelyezett több szintű deviátorok alkalmazásával érhető el.

A kábel belengését csillapító berendezés beépítésével lehet korlátozni. A csillapító berendezést a lehorgonyzó blokkban szokás elhelyezni, a lehorgonyzó ponttól meghatározott optimális távolságban. A csillapítás alapvetően két féle lehet, súrlódásos illetve viszkózus.

## **5. A KÁBELEK TARTÓSSÁGA, JAVÍTÁSA, ELLENŐRZÉSE**

A kábelek tervezési élettartama a kábel kialakítástól függ. Cserélhető kábeleknél ez a híd tervezett élettartamának fele, a szokás szerint 50 év. Nem cserélhető kábeleknél ez megegyezik a műtárgy élettartamával, ami a szokás szerinti 100 év.

A kábelek karbantartásának ciklusa közelítőleg 15 év, azaz ilyen időközönként kell nagyobb átvizsgálást végezni a kábeleken. Az átvizsgálás módja változó. Leginkább szűrőpróbaszerű vizsgálatokat lehet végezni, egy kiszemelt kábel cseréjével, majd a cserélt kábel megvizsgálásával lehet megbecsülni a többi beépített kábel állapotát, és adott esetben előirányozni a szükséges javításokat.

A karbantartást jelentősen elősegíti egy megfelelő monitoring rendszer kiépítése. Ennek részét képezi egy ütemezett felülvizsgálati program, és tartalmazhat telepített vizsgáló berendezés kiépítését is. Utóbbi állandó megfigyelést tesz lehetővé a műtárgy élettartama során; ekkor előre kijelölt kábelekre vizsgáló berendezéseket, pl. ultrahangos vizsgáló berendezést szerelnek fel, amely a kábel állapotát (feszültség, korrózió,

esetleges szakadás) figyeli, rögzíti és továbbítja a központba. Az adatok elemzése alapján a karbantartás a kijelölt időszak előtt is szükségessé válhat.

## 6. MODELLEZÉS

A statikai és dinamikai vizsgálatok elvégzéséhez szükséges van a műtárgy numerikus modellezésére. A statikai modell a vizsgálat megkívánt pontosságától függően lehet kétdimenziós, de a részletes vizsgálatához már egy háromdimenziós modell kifejlesztése szükséges. A kábelek modellezésére több lehetőség van. A lehetőségek közül a megkövetelt pontosság és a számítási idő függvényében kell választani.

A kábel az önsúlya és más terhek hatására belóg a két lehorgonyzási pont közötti hálózati egyeneshez képest. A belógás egy fiktív rugalmasságot ad a kábelnek. Amennyiben a kábelt a két lehorgonyzási pontja közötti rúd elemként értelmezzük, akkor ahhoz a belógás következtében egy fiktív rugalmassági tényezőt lehet hozzárendelni. Ez a fiktív rugalmasság eltér a kábel anyagi rugalmasságától, függ a kábel belógásától, azaz a hosszától és a súlyától, valamint a kábelben lévő pillanatnyi erőttől. A kábel-elem rugalmasságát egy megfelelően választott rugalmassági modulussal lehet jellemezni, amely viszont minden terhelési állapotban más-más értéket vesz fel. Ennek követése még számítógépes modellekben is bonyolult, és nem mindig kifizetődő. A számítás egyszerűsítésére bevezethető egy állandónak tekintett helyettesítő rugalmassági modulus [1][2].

A helyettesítő rugalmassági modulus a kábelerő átlagos értékével számított látzólagos rugalmassági modulus. Ennek két értékét, az érintő (tangenciális) valamint a szelő (szekáns) rugalmassági modulusokat lehet meghatározni. Mindkét kifejezés tartalmazza a kábel előbb leírt jellemzőit, eltérést közöttük csak a pontosság jelent. Míg az érintő rugalmassági modulus csak a várható kábelerőt veszi figyelembe, addig a szelő modulus a minimális és maximális kábelerőt is számításban veszi.

A kábel modellezését több módon végezhetjük. A pontosság függvényében lehet teljes hosszában egy rúddal, vagy a pontosság növelése érdekében, viszont a számítási idő rovására, több rúdból álló rúdlánccal helyettesíteni. Bonyolult modelleknél a kábelt egy speciális kábel-elemmel is szokás modellezni. Ez figyelembe veszi a kábel gyártási hosszát, a benne lévő feszítő erőt, az alakját, valamint azt, hogy a kábel végpontjaiban a kábelerő érintő irányú és nem esik egybe a két lehorgonyzási pont által meghatározott egyenessel [3].

## 7. ÖSSZEFOGLALÁS

A BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén két, hamarosan építésre kerülő Duna-híd vizsgálatát végeztük 2004-ben [4][5]. Az előzőkben ismertettekkel összhangban került megoldásra a hidak végleges kábel kialakítása.

Az M0 körgyűrű északi szakaszán átvezetett Duna-ág hídjának egy szakasza egy 300 m támaszközü ferdekábeles híd. A híd teljes hossza 600 m, szélessége mintegy 35 m. A merevítőtartót a pilonokhoz a tartó széleihez rögzített kétsíkú kábelezéssel függesztették fel. A felfüggesztésben  $2 \times 22 \times 2 = 88$  kábelt alkalmaztak. A kábelek KPE burkolócsőben párhuzamosan vezetett 7 eres sodort pász mákból állnak. A pász mák száma az igénybevételnek megfelelően kábelenként eltérnek, 61, 55, 37 és 31 pász má-

ból álló kábeleket terveztek. A pász-mák anyaga Fp 150/1860 jelű. A galvanizált pász-mák egyedi burkolat nélküliek, így a köztük és a burkolócső közötti hézagot zsírral kell kiinjektálni. A pilonokban alakították ki a kábelek fix lehorgonyzó blokkjait. Egy speciális acélszerkezet közvetíti a terhet a pilon másik oldalán lévő kábelre, illetve a pilonra.

A Dunaújvárosi Duna-híd 307,80 m támaszkö-zű kosárfüles ívhíd, amely-nél két oldalon, oldalanként 24, összesen 48 db kábel tartja az acélszerkezetű merevítőtartót. A kábelek KPE burkolócsőben vezetett 7 eres sodort pász-mákból állnak, kábelenként 19 illetve 24 pász-mával. A pász-mák anyaga Fp 150/1860 jelű. A pász-mák egyedileg KPE burkolattal védettek, így a burkolócső belsejében a pász-mák között nincs kitöltő anyag. A kábelek feszítése pász-mánként történik.

## HIVATKOZÁSOK

- [1] Gimsing N. J.: Cable Supported Bridges. *John Wiley*, (1997).
- [2] Cable stays, recommendations of French interministerial commission on Prestressing, *Setra*, 2002.
- [3] Karoumi R.: Some Modeling Aspects in the Nonlinear Finite Element Analysis of Cable Supported Bridges, *Computer and Structures*, vol. 71, (1999), pp 397-412.
- [4] M0 Autópálya Északi Duna-híd. Ferdekábeles mederhíd – független statikai vizsgálat, Jelentés, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke*, 2004. április.
- [5] Dunaújvárosi Duna-híd, Mederhíd – Statikai vizsgálatok, Jelentés, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke*, 2004. április.